

# Ganzheitliche integrierte Modellierung wasserwirtschaftlicher Systeme

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt zur  
Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation  
von

Dipl.-Ing. Frank Ludwig Reußner  
aus Groß-Gerau



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Erstreferent: Prof. Dr.-Ing. M. W. Ostrowski  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann

Tag der Einreichung: 17.01.2011  
Tag der mündlichen Prüfung: 15.03.2011

D17  
Darmstadt, 2011



---

## Vorwort

---

Der Paradigmenwechsel von der sektoralen Betrachtungsweise hin zu einer ganzheitlichen Bewirtschaftung von Wassermenge und –güte in Flussgebieten wird dokumentiert und implementiert durch die EU Wasserrahmenrichtlinie 2000/60. Dieser gemeinschaftliche Ordnungsrahmen zur Erhaltung bzw. Schaffung eines guten ökologischen und chemischen Zustandes verlangt nach neuen Planungswerkzeugen. Mathematische Modelle sind seit Jahrzehnten in der Wasserbewirtschaftung erfolgreich im Einsatz. Um den Paradigmenwechsel in der Praxis umzusetzen, wurden in der letzten Dekade vielfach die aus sektoralen Planungsmethoden bekannten Modelle behelfsweise über sehr einfache Schnittstellen miteinander gekoppelt. Besonderer unmittelbarer Handlungsbedarf besteht bei der Analyse intensiv durch Siedlungstätigkeit und Landwirtschaft beeinflusster Einzugsgebiete. Im Bereich der urban überformten Gewässer hat sich die Problematik ergeben, möglichst bald über geeignete Maßnahmepakete zu entscheiden, damit die z. T. erheblichen negativen Auswirkungen von emittierten hydraulischen und stofflichen Stoßbelastungen und Frachten soweit reduziert werden können, dass in absehbarer Zeit ein guter Gewässerzustand erreicht wird.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, wie die neuen komplexen Problemstellungen über mathematische Modellanalysen effizient analysiert und gelöst werden können. Die derzeit noch oft praktizierte sequentielle Anwendung von Teilmodellen stellt langfristig keine akzeptable Lösung dar. Andererseits ist es aus wirtschaftlichen und zeitlichen Gründen nicht praktikabel, vollständig neue ganzheitliche Modellsysteme zu entwickeln. Der sich anbietende Weg ist eine Integration von bestehenden Teilmodellen in ganzheitliche Modellsysteme. Dieser Aufgabe hat sich Frank Reußner gewidmet. Die Verbindung von hydraulischem und hydrologischem Fachwissen mit den Erfordernissen zukunftsweisender informatorischer Ansätze stellt dabei eine grundsätzliche Herausforderung dar. Konkrete Herausforderungen bestehen in der Kopplung/Integration von Modellalgorithmen, die umfassenden Datenverwaltungsprobleme und die Handhabbarkeit.

Die Arbeit stellt einen wichtigen und bereits jetzt viel beachteten Beitrag zur Entwicklung innovativer integrierter Modellierungskonzepte dar; diese erwiesen sich auch als praktisch umsetzbar. Sie stellt mit der Integration von Modellansätzen, Datenverwaltung und Ergebnisauswertung im Hinblick auf die Bewältigung aktueller Aufgaben der integrierten Wasserbewirtschaftung einen innovativen, unmittelbar umsetzbaren Beitrag dar, der deutlich über den aktuellen Stand des Wissens und der Entwicklung hinaus geht.

Darmstadt, im April 2011

Prof. Dr.-Ing. Manfred Ostrowski

---

---

## Inhalt

---

1.....	Einleitung	1
1.1	Stand der integrierten Modellierung	3
1.2	Zum Titel der Arbeit	6
1.3	Hypothese und Fragestellungen	7
1.4	Gliederung der Arbeit	9
2.....	Begriffe	10
2.1	Modelldomäne	10
2.2	Begriffe der Softwareentwicklung	10
2.3	Medienbruch	14
2.4	Standard	14
2.5	Ontologie	14
3.....	Grundlagen	16
3.1	Integrierte Modellierung	16
3.2	Generische IT-Infrastrukturen	30
4.....	Analyse und Methodik der Erweiterung der integrierten Modellierung	46
4.1	Detailfragen und Detailprobleme der gekoppelten Simulation	46
4.2	Austauschbarkeit	49
4.3	Interdisziplinarität	50
4.4	Georeferenzierung und Benutzerfreundlichkeit	53
4.5	Verwendete Modellsysteme und weitere Komponenten zur Demonstration eines ganzheitlichen Modellierungssystems	54
4.6	Ergebnisse der Analyse und Methodik	65
5.....	Entwicklung einer ganzheitlichen integrierten Modellierung	66
5.1	Architekturentwurf eines ganzheitlichen integrierten Modellsystems	67
5.2	Nutzung vorhandener Standards in dem Architekturentwurf	72
6.....	Implementierung und Demonstration eines ganzheitlichen integrierten Modellsystems	75
6.1	Zielsetzung für das prototypische ganzheitliche integrierte Modellsystem	75
6.2	Arbeiten an Modellsystemen und Komponenten	78
6.3	Implementierung der Standards	83
6.4	Demonstration der ganzheitlichen integrierten Modellierung anhand von Fallbeispielen	85

---

---

7..... Zusammenfassung, Bewertung und Ausblick	105
7.1    Bewertung	105
7.2    Zusammenfassung	106
7.3    Ausblick	108
8..... Literaturverzeichnis	I
9..... Anhang	XIV
9.1    Anpassungen der generic engine interface (GEI)	XIV
9.2    Mittlere Windgeschwindigkeiten nach Deutschem Wetterdienst	XVII
10... Curriculum Vitae	XVIII

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1.1 Fragestellungen an ein ganzheitliches integriertes Modellsystem .....	8
Tabelle 3.1 Interaktion der Modelldomänen der integrierten Modellierung .....	18
Tabelle 3.2 Ausgewählte Datenformate .....	24
Tabelle 3.3 Anzahl der Regenentlastungsanlagen in Deutschland 2007 (nach Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.) .....	29
Tabelle 4.1 Größe von Datentypen .....	62
Tabelle 4.2 Größe eines Tupels der Tabelle Value.....	62
Tabelle 4.3 Größe eines Tupels der Tabelle Parameter und Ort .....	63
Tabelle 4.4 Parameter zur Ermittlung der Tupelanzahl für eine Langzeitsimulation.....	63
Tabelle 4.5 Berechnung der Größe der anfallenden Daten der Langzeitsimulation.....	63
Tabelle 6.1 Abstände der X-Y-Punkte nach Himmelsrichtungen .....	93

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 2.1 Klassendiagramm des Entwurfsmusters wrapper.....	11
Abbildung 2.2 Wrapper als sprachenübergreifender Adapter (von Fortran nach C#) .....	12
Abbildung 2.3 Klassendiagramm des Entwurfsmusters strategy patterns.....	12
Abbildung 2.4 Beispiel für <i>strategy pattern</i> .....	13
Abbildung 3.1 Teilbereiche der integrierten Modellierung (nach (Reußner und Heusch, 2008)) .....	17
Abbildung 3.2 Arbeitsschritte der integrierten Modellierung.....	19
Abbildung 3.3 Wichtigste Modelldomänen der integrierten Modellierung.....	20
Abbildung 3.4 Kategorien der Modelldaten in der integrierten Modellierung.....	22
Abbildung 3.5 Arten der Kopplung .....	27
Abbildung 3.6 Interaktionen und Kategorien der Kopplung von Domänen und Daten.....	27
Abbildung 3.7 Kanalnetzarten in Deutschland im Jahr 2007 (nach Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.).....	29
Abbildung 3.8 Beispiel des USB-Standards als generische Schnittstelle .....	30
Abbildung 3.9 Pull-Mechanismus von OpenMI.....	33
Abbildung 3.10 OpenMI basiertes integriertes Modellsystem des ihwb (nach (Reußner et al., 2009)) .....	35
Abbildung 3.11 OpenMI Adapter für Rechenkerne (nach (Reußner und Heusch, 2008)) .....	36
Abbildung 3.12 Aufgaben bei der Implementierung der OpenMI-Fähigkeit von Modellsystemen .....	37
Abbildung 3.13 Aufbau der Adapter am Beispiel von BlueM.Sim (Reußner et al., 2009).....	38
Abbildung 3.14 Beispiele für Standards der Datenhaltung .....	39
Abbildung 3.15 Datenmodell von netCDF.....	41
Abbildung 3.16 Speicherung der Daten in netCDF.....	42
Abbildung 3.17 Network Common Data Form Language (CDL) und netCDF.....	42
Abbildung 3.18 Beispiel einer Darstellung einer netCDF-Datei mittels CDL.....	43
Abbildung 3.19 Teile des OpenGIS® Standards, die bei Sensor Web Enablement des OGC verwendet werden (nach (Botts et al., 2008)) .....	45
Abbildung 4.1 Inter- und Transdisziplinarität (aus (Ostrowski, 2008)) .....	50
Abbildung 4.2 Komplexität der wasserwirtschaftlichen Modellierung (nach (Ostrowski, 2001)) .....	51

Abbildung 4.3 Schema eines Prognosesystems zur Beurteilung der Immissionen basierend auf der zukünftigen Stadtentwicklung.....	52
Abbildung 4.4 Schema eines integrierten Modellsystems zur Maßnahmenplanung .....	53
Abbildung 4.5 Berechnungsoptionen für Transportelemente in BlueM.Sim.....	55
Abbildung 4.6 Stoffgruppen des Simple Water Quality Modell (nach (Alex und Schütze, 2009)) .....	58
Abbildung 4.7 Abgebildete Prozesse des Simple Water Quality Modell (nach (Alex und Schütze, 2009)) .....	58
Abbildung 4.8 Beschreibung der Prozesse des Simple Water Quality Modells .....	59
Abbildung 4.9 Prozessmatrix des Simple Water Quality Modells (Alex und Schütze, 2009) ..	60
Abbildung 4.10 Einfache Datenbankstruktur zur Speicherung von Ergebnisdaten (Reußner et al., 2009) .....	61
Abbildung 4.11 Aufbau und Schnittstellen des Generic Engine Interface (GEI) .....	64
Abbildung 5.1 Legende für Architekturskizzen.....	66
Abbildung 5.2 Architektur eines einfachen Modellsystems.....	67
Abbildung 5.3 Architektur eines verteilten Modells.....	69
Abbildung 5.4 Architektur eines verteilten Modells mit zusätzlicher Schnittstelle für Daten..	70
Abbildung 5.5 Architektur des ganzheitlichen integrierten Modellsystems .....	71
Abbildung 5.6 Nutzung multipler Standards.....	72
Abbildung 5.7 Austauschbarkeit durch Nutzung des Standards OpenMI .....	73
Abbildung 5.8 Nutzung multipler Standards für ein ganzheitliches integriertes Modellsystem .....	74
Abbildung 6.1 Zielsetzung für das implementierte ganzheitliche integrierte Modellsystem ...	76
Abbildung 6.2 Implementiertes ganzheitliches integriertes Modellsystem .....	77
Abbildung 6.3 Eingabe von räumlichen Daten in der *.SYS Datei von BlueM.Sim.....	78
Abbildung 6.4 Satz aus Elementen und Austausch mittels OpenMI .....	79
Abbildung 6.5 Klassendiagramm BlueM.Analyser mit erweiterten Ganglinienausgaben .....	81
Abbildung 6.6 Schnittstellen von C# zur netCDF Bibliothek .....	84
Abbildung 6.7 Mittels OpenMI verknüpftes Gesamtmodell .....	86
Abbildung 6.8 Verknüpfungen zwischen GEI und SMUSI.....	87
Abbildung 6.9 Anbindung des Gewässermodells an die Auswertungskomponente .....	87
Abbildung 6.10 Generierte netCDF Datei.....	88
Abbildung 6.11 Steckbrief Fallbeispiel Obere Modau.....	89



Abbildung 6.12 Systemlogik des Datensatzes obere Modau (aus (Bach, 2010)) .....	90
Abbildung 6.13 Modellierter Bereich der Modau und georeferenzierte Punkte.....	91
Abbildung 6.14 Untersuchte Szenarien.....	92
Abbildung 6.15 Auszug aus der netCDF Datei mit dem Niederschlag des Szenarios Süd-Nord .....	94
Abbildung 6.16 Zugrichtung des Niederschlags und resultierende Änderungen der Zeitschritte (West nach Ost) .....	95
Abbildung 6.17 Zugrichtung des Niederschlags und resultierende Änderungen der Zeitschritte (Ost nach West) .....	96
Abbildung 6.18 Zugrichtung des Niederschlags und resultierende Änderungen der Zeitschritte (Süd nach Nord) .....	97
Abbildung 6.19 Integriertes Modell der oberen Modau in OpenMI.....	98
Abbildung 6.20 Ganglinie des letzten Gerinneabschnitts (S34) – Szenario Windstill.....	99
Abbildung 6.21 Ganglinie des letzten Gerinneabschnitts (S34) für alle vier Szenarien.....	100
Abbildung 6.22 Detailansicht des maximalen Abflussereignisses (für S34) – alle Szenarien	100
Abbildung 6.23 Detailansicht – Vergleich Szenario Windstill mit Süd Nord (für S34) .....	101
Abbildung 6.24 Detailansicht – Vergleich Szenario Windstill mit Süd Nord (für S49 hinter Kläranlage Ernthofen).....	101
Abbildung 6.25 Eigenschaftenfenster von ArcView™ für netCDF-Datei .....	102
Abbildung 6.26 Kartendarstellung der Simulationsergebnisse (netCDF) mit ArcView™ .....	103
Abbildung 9.1 Angepasste Konfigurationsdatei von GEI – Entitäten (phyvgl.cfg.dat ) .....	XV
Abbildung 9.2 Angepasste Konfigurationsdatei von GEI – Einheiten (phydef.cfg.si.dat) .....	XVI
Abbildung 9.3 Angepasste Konfigurationsdatei von GEI – physikalische Größen (phydef.cfg.rest.dat).....	XVI
Abbildung 9.4 Mittlere Windgeschwindigkeiten in 80 m Höhe (Karte vom Deutschem Wetterdienst) .....	XVII

---

# 1 Einleitung

---

*„Eine Reise von tausend Meilen beginnt mit dem ersten Schritt.“*

*(Laotse)*

Wo immer sich der Mensch niedergelassen hat, nutzte er Wasser und produzierte damit Abwasser. Die historische Entwicklung der Abwasserbehandlung geht von einfachen oberirdischen Kanälen bis zum gesteuerten Kanalnetz mit angeschlossenen Kläranlagen (Gujer, 2006). Im Zuge dieser Entwicklung haben sich auch die Fragestellungen verändert. Auch sind die Anforderungen komplexer geworden. Beispielsweise war das Ziel bei der Beurteilung von Mischwasserentlastungen in das Gewässer in den 60er Jahren vor allem, die Belastungen des Gewässers von den Siedlungsgebieten fernzuhalten, oder in den 90er Jahren war das Ziel die Entlastungsanlagen einzeln zu beurteilen, so stehen wir heute vor den Herausforderungen, das Zusammenwirken aller auf das Gewässer wirkenden, anthropogenen Einflüsse zu beurteilen und den Zustand gegebenenfalls durch Maßnahmen zu verbessern. Dies führt dazu, dass die Komplexität der wasserwirtschaftlichen Systeme zugenommen hat, um die aktuellen Fragestellungen adäquat beantworten zu können. Um auf diese Komplexität reagieren zu können, stellt das Werkzeug der Modellierung einen geeigneten, wenn nicht unverzichtbaren Ansatz dar.

Modellierung wird in der Wasserwirtschaft schon seit geraumer Zeit eingesetzt. Für die betrachteten Sektoren der Wasserwirtschaft haben sich unterschiedliche Modelldomänen (siehe Kapitel 2.1) ausgebildet. So gibt es z. B. die Niederschlags-Abfluss-Modellierung (N-A-Modellierung), die Kanalnetzmodellierung, die Kläranlagenmodellierung, die Gewässermodellierung und die Grundwassermodellierung. Aus weiteren Fachbereichen gibt es Wettermodelle, Klimamodelle, Stadtentwicklungsmodelle etc. Jede dieser Modelldomänen wird für die Beantwortung spezieller Fragestellungen genutzt, die aus den Disziplinen Hydrologie, Hydromechanik, Wasserbau oder Kläranlagentechnik heraus gestellt werden. Bei detaillierten Fragestellungen müssen die Modelldomänen bezüglich ihres Zusammenwirkens betrachtet werden, wie z. B. eine N-A-Modellierung, die mit einem Gewässermodell oder Kanalnetzmodell gekoppelt wird. Nähert man sich der Thematik aus dem Blickwinkel der Fachdisziplinen, so ist zu beobachten, dass mit detaillierteren Fragestellungen ehemals getrennte Disziplinen gemeinsam betrachtet werden müssen. Als Schlagwort dafür hat sich integrierte Modellierung (auch integrale Modellierung) etabliert.

Allerdings wird die integrierte Modellierung als Begriff nicht nur im hydrologischen Kontext verwendet. So wird beispielsweise in der Automobilforschung eine Vorhersage der Benutzerfreundlichkeit eines *in-car interface* mit der Kopplung von Fahrsimulation und Simulation der Mobilfunknutzung als integrierte Modellierung bezeichnet (Salvucci, 2001). Im Folgenden ist deshalb in dieser Arbeit mit integrierter Modellierung (iM) immer der Kontext der Urbanhydrologie bzw. Siedlungswasserwirtschaft verbunden.

---

In der Urbanhydrologie steht die iM für die Verschmelzung oder Kopplung der Fachdisziplinen Abwassertechnik, Siedlungswasserwirtschaft und Hydrologie. Aus Sicht der Modelldomänen werden Kanalnetzmodelle, Kläranlagenmodelle, N-A-Modelle, Gewässermodelle und Grundwassermodelle miteinander gekoppelt. Welche und wie viele dieser Modelle gekoppelt werden müssen, damit von iM gesprochen werden kann, ist nicht einheitlich definiert. Der Leitfaden der HSGSim (2008) definiert iM als Kopplung von mindestens drei Modelldomänen (in der Regel Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer). Rauch et al. (2002) sprechen schon bei zwei gekoppelten Modelldomänen von iM.

Eine Herausforderung der iM ist die Kopplung der Modelldomänen, da die Schnittstellen zwischen den Modellen nicht nur den Datenaustausch darstellen, sondern auch die Skalenproblematiken und Rückkopplungen lösen müssen. Diese sind räumlicher, zeitlicher und qualitätsbezogener Natur. Ein Beispiel für solche Problemstellungen beschreibt Marx (2007) bei der Kopplung von Wetterradarmessungen mit hydrologischen Modellen. Ein zweites Beispiel sind die Problematiken mit rückgekoppelten Systemen, wie sie z. B. bei Kopplung von Grundwasser und Oberflächengewässer auftreten (Ruf et al., 2006) oder bei der Kopplung von Strömungsmodellen für poröse Medien mit Strömungsmodellen für freie Strömungen (Dogan, 2010). Ein weiteres Beispiel ist die aktuelle Diskussion in der Forschung, wie bei der Kopplung von Kläranlagenmodell und Kanalnetz der unterschiedliche Detaillierungsgrad der betrachteten Stofffraktionen behandelt werden soll – entweder mittels detaillierterem Kanalnetzmodell oder mittels vereinfachtem Kläranlagenmodell.

Eine weitere Herausforderung der iM ist, dass eine integrierte Betrachtung einen erhöhten Aufwand der Datenerfassung beinhaltet. So ist beispielsweise der Sauerstoffgehalt im Abwasser bei der Kanalnetzmodellierung von geringem Interesse. Wird ein Kanalnetz aber mit einem Gewässermodell gekoppelt, so spielt der Sauerstoffgehalt für die Beurteilung der Gewässergüte eine entscheidende Rolle und muss folgerichtig bei jeder Einleitungsstelle des Kanalnetzes in ein Gewässer berücksichtigt werden.

Eine dritte Herausforderung der iM liegt nicht in der Modellwelt selbst, sondern in der Handhabbarkeit. Je mehr Modelldomänen gemeinsam betrachtet werden, desto mehr Fachkompetenz muss in die Modellierung eingebracht werden. Das führt zu der Frage, inwieweit ein System der iM auf die Interdisziplinarität Rücksicht nehmen muss. Ein Blick in die Vergangenheit der Modellentwicklung zeigt, dass eine Erweiterung des Betrachtungsrahmens in der Regel eine Erweiterung einer bestehenden Simulationssoftware darstellte. Aus diesem Grund ist für die Handhabung der erweiterten Simulationssoftware auch die Fachkompetenz im gesamten Betrachtungsrahmen erforderlich. Inwieweit dies bei der iM noch möglich ist bzw. ob gekoppelte, fachspezifische Simulationssoftware nicht zielführender ist, muss und wird in dieser Arbeit geklärt werden.

---

## 1.1 Stand der integrierten Modellierung

---

An welchem Punkt die iM momentan steht, ist nicht einfach zu beantworten. Grundsätzlich ist bemerkenswert, dass die Ideen der iM und Gedankenmodelle zur Umsetzung schon seit mehr als einer Dekade formuliert wurden. So ist schon seit den 70er Jahren der Bedarf einer iM benannt (Metcalf und Eddy, 1971; Beck, 1976; Ostrowski und Alsenz, 1990). Mitte der 90er Jahre wurden die Anforderungen der stofflichen Betrachtung weiter konkretisiert. Die Wichtigkeit der immissionsorientierten Beurteilung der Entlastungen aus den Kanalnetzen bzw. deren Wirkungen auf das empfangende Gewässer wurden von Novotny und Witte (1997), Rauch und Harremoës (1996) sowie Rauch und Harremoës (1999) als Anforderung an die stoffliche Betrachtung demonstriert. Ende der 90er Jahre sind Gedankenmodelle zur Umsetzung der iM formuliert worden (FWR, 1998; Rauch und Harremoës, 1999; Bertrand-Krajewski et al., 2000).

Seit dem ist eine einheitlichen Interpretation der iM nicht mehr zu beobachten. Das liegt daran, dass bei den Umsetzungen der iM in den letzten 10 Jahren vor allem konkrete Fragestellungen beantwortet werden sollten. So betonten beispielsweise Schütze et al. (2002) und Vanrolleghem et al. (2005) das Zusammenfügen der Bereiche Kanalnetz und Kläranlage. Muschalla (2006) legte den Fokus auf die Kopplung von Kanalnetz und Gewässer. Die Interaktion von Kläranlage und Gewässer war wiederum die antreibende Thematik von Solvi (2006). Durch die unterschiedliche Gewichtung der Modelldomänen sind alle vier iM-Systeme im Ergebnis unterschiedlich, obwohl sie alle die drei Modelldomänen Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer miteinander koppeln. Daraus kann abgeleitet werden, dass entweder die iM noch kein einheitliches Ziel erreicht hat oder aber das iM vielmehr für einen Sammelbegriff steht.

---

### 1.1.1 Stand der Forschung

---

Zum jetzigen Zeitpunkt existieren in der iM ausschließlich prototypische Systeme (Piasecki et al., 2010; Donchyts und Jagers, 2010; Sonnenberg, 2009; Kessler et al., 2009; Ames et al., 2009; Rahman et al., 2005; Ruf et al., 2006; Verweij et al., 2010; Peters, 2007). Diese Prototypen können in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: verflochtene Modellsysteme und gekoppelte Modellsysteme. Erstere charakterisieren sich durch die Implementierung aller betrachteten Modelldomänen in ein einziges Modellsystem (*Supermodel*). Letztere beinhalteten für jede Modelldomäne ein eigenes Modellsystem, die über Schnittstellen miteinander verbunden werden (*Interfaced Model*). Die Begriffe *Supermodel* und *Interfaced Model* stammen aus der Kläranlagenmodellierung (Vanrolleghem et al., 2005b; Grau et al., 2009) und wurden von Reußner und Heusch (2008) für die iM neu definiert. Die Schnittstellen des *Interfaced Model* können in zwei Unterkategorien geteilt werden. Zum einen in die Kategorie der proprietären Schnittstellen, die exakt auf die Bedürfnisse zugeschnitten sind, allerdings nur bedingt übertragbar auf andere Modellsysteme sind. Zum anderen erfolgt die Aufteilung in die Kategorie der Kopplung über generische Schnittstellen. Ein Vertreter von generischen Schnittstellen ist beispielsweise OpenMI (Gergersen et al., 2007).

Die typischen Prozesse bei der Erstellung eines integrierten Modells sind (1) die Datenerfassung bzw. deren Aufbereitung, (2) die Datenformatkonvertierung in das spezifische Eingabe-

---

format der verwendeten Modelle, (3) die Modellierung der einzelnen Modelle bzw. deren Kopplung, (4) die Simulation des Systems (ggf. mehrere Simulationen bei sequentieller Kopplung) und (5) die Datenformatkonvertierung der Ergebnisdaten zur Auswertung und Visualisierung. Bei einer Optimierung bzw. Kalibrierung des Systems sind zusätzliche Iterationen von Punkt (4) und Punkt (2) notwendig.

Der Prozess der Datenverarbeitung fängt an in der aktuellen Forschung an Bedeutung zu gewinnen (Botts et al., 2008; Henson et al., 2009; Knapen et al., 2009; Jagers, 2010; Verweij et al., 2010). Dabei geht es hauptsächlich darum, den Informationsfluss nicht durch Medienbrüche (z. B. manuelle Konvertierung der Daten) zu hindern, sondern sich generischer Standards zu bedienen. Diese generischen Standards bilden zudem Schnittstellen für zukünftige Systeme. Hauptfokus der Forschung liegt hierbei auf den Standards des *Open GIS Consortiums* (OGC), die sich überwiegend mit georeferenzierten Daten befassen.

---

### 1.1.2 Stand der Praxis

---

Das Werkzeug der Modellierung von wasserwirtschaftlichen Systemen ist in der Wasserwirtschaft gängige Praxis. So werden beispielsweise Kanalnetze mit hydrodynamischen Simulationsprogrammen dimensioniert (ATV, 1999, 1994; ATV-DVWK, 2001) oder es werden die Entlastungen aus Mischwasserüberläufen emissionsorientiert beurteilt (Muschalla et al., 2007). In Bezug auf die iM unterscheidet sich der Stand der Technik allerdings maßgeblich vom Stand der Forschung. Während in der Forschung integrierte Modellsysteme entwickelt und benutzt wurden, so ist die iM bisher in der Praxis nur selten angewendet worden.

Die Anforderungen eine iM zu nutzen, sind aber durchaus vorhanden. Nicht zuletzt ist mit der Verabschiedung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) der „gute chemische und ökologische Zustand des Gewässers“ durch einen kombinierten Ansatz der emissions- und immissionsbasierten Beurteilung der Belastungen auf das Gewässer zu erreichen (EC, 2000). Durch die Komplexität der Faktoren, die auf das Gewässer einwirken, bietet sich gerade hier die iM an (HSGSim, 2008). Allerdings zeigt sich, dass die Komplexität den Anwender (und ggf. den behördlichen Prüfer) in hohem Maße fordert.

Beispielsweise wird bei einer immissionsorientierten Beurteilung der Mischwasserüberläufe aus Kanalnetzen (combined sewer overflow – CSO) gegenüber der emissionsbasierten Betrachtung das Verständnis der Stoffprozesse im aufnehmenden Gewässer wichtig. Aus diesem Grund reicht die Fachkompetenz in einer Modelldomäne nicht mehr aus. Das Wissen in der Modelldomäne Kanalnetz muss um das Wissen der Modelldomäne Gewässergüte erweitert werden. In der Forschung werden diese beiden Wissensbereiche in der Regel in einer Person vereint. In der Ingenieurpraxis sind die Wissensbereiche meist personell getrennt, d. h. eine Person ist auf Kanalsysteme und eine weitere auf Gewässergüte spezialisiert. Für eine flächendeckende Umsetzung, wie sie in der WRRL gefordert wird, fehlt deshalb aktuell zum einen die praxisgerechte Modellierungssoftware, zum anderen aber auch die Möglichkeit kooperativ an einem integrierten Modell zu arbeiten. Zwar sind iM-Systeme in Planung (Brehmer et al., 2009), allerdings sind diese in der Praxis noch nicht eingeführt.

---

Auch außerhalb von Europa gibt es Bestrebungen, für die Beurteilung von CSOs einen immissionsbasierten Ansatz zu wählen (USA, 1977; EPA, 1995). Treibende Kraft ist hier die *Environmental Protection Agency* (EPA). Aber auch in den USA gibt es noch keine der Ingenieurpraxis gerechte Umsetzung der iM, so dass das Thema noch der Forschung vorbehalten bleibt.

---

### 1.1.3 Stand der IT-Technologien der Simulationssoftware

---

Parallel zu der Formulierung der Anforderungen an die iM hat sich auch die IT-Technologie gewandelt. Ende der 80er Jahre wurde das Paradigma der prozeduralen Programmierung durch die objektorientierte Programmierung weitgehend abgelöst (Stroustrup, 1986). Standen mit der prozeduralen Programmierung bei dem Entwurf von Software die Abläufe eines Prozesses im Vordergrund, so wird bei der objektorientierten Softwarearchitektur (OOA) ein generischer Ansatz verfolgt. In der OOA werden Objekte definiert, die neben Attributen auch Methoden besitzen. Um dies zu verdeutlichen ein Beispiel: Ein Objekt „Gewässer“ besitzt die Attribute „Abfluss“, „Zufluss“, „Rauhigkeitsbeiwert\_kst“ und „Gefälle“. Zusätzlich dazu besitzt das Objekt „Gewässer“ aber auch eine Methode „Berechne\_Abfluss\_nach\_Manning\_Strickler“.

Die OOA sieht auch die Verknüpfung von Objekten zu einer Objektstruktur vor. Um beim Beispiel des Objekts „Gewässer“ zu bleiben, kann dieses eine Verknüpfung zu einem Objekt „Gewässergüte“ haben. Gamma et al. (1995) zeigen mit ihren objektorientierten Entwurfsmustern (der englische Begriff *software pattern* hat sich etabliert), dass die OOA einen großen Beitrag zur Wiederverwendbarkeit von entworfenen Lösungen geleistet hat. Eng verbunden mit der Wiederverwendbarkeit steht die Weiterentwickelbarkeit von Software, bei der die OOA Erweiterungen der Objekte um Attribute und Methoden erlaubt oder das Hinzufügen neuer Objekte, welche die Objektstruktur erweitern.

Bei großen Softwareprojekten entsteht meist eine große Objektstruktur. Diese ist durch ihre Komplexität immer schwerer zu erweitern und kann zu Lasten der Performanz gehen. Performanz ist ein Begriff aus der Informatik, der für die Leistung bzw. das Zeitverhalten steht. Die negative Auswirkung der Komplexität auf die Performanz liegt darin, dass Erweiterungen nicht performant umgesetzt werden können, ohne die Objektstruktur grundlegend zu ändern. Das führt dazu, dass entweder die Entwicklung mit einem erhöhten Aufwand betrieben werden muss, da die Objektstruktur verändert werden muss, oder die Erweiterung ohne Strukturänderungen die Performanz beeinträchtigt. Aus diesem Grunde entwickelte sich in den letzten Jahren ein weiteres Programmparadigma. Das neue Programmparadigma stellt einen Ansatz dar, schwerfällige Objektstrukturen zu vermeiden oder zumindest anwendbar zu halten, indem die OOA nicht strikt befolgt wird, sondern der Ansatz der Aktion bzw. des Gebrauchs (englisch *service*) im Vordergrund steht. Dadurch können schlankere Lösungen implementiert werden, wenn auch auf Kosten der Strukturierung der Objekte. Dieses Prinzip der Architektur wird Service Oriented Architektur (SOA) genannt. Vereinfacht kann der Unterschied mit Begriffen aus der Grammatik erläutert werden. Wird ein System mit OOA anhand von Nomen konstruiert, so baut SOA vermehrt auf Verben auf. Ein weiteres Paradigma ist die funktionale Programmierung, die bei dem Entwurf vollständig auf Nomen verzichtet und ausschließlich Verben verwendet. Meist wird SOA bei Web Services angewandt (Krafzig et al., 2004). Fowler



---

(2002) zeigt neben seinen Entwurfsmustern für *Enterprise Applications* eine Entscheidungshilfe, wann welche Softwarearchitektur und welches Paradigma zu bevorzugen ist.

In der Modellentwicklung im wasserwirtschaftlichen Bereich sind die oben beschriebenen neuen Paradigmen der IT-Technologien kaum berücksichtigt worden. Eine Vielzahl von Modellsoftware wurde in den 90er Jahren entwickelt und als Architektur meist das prozedurale Paradigma verwendet (ihwb, 2000; Bente, 2001; Arnold, 1990; Refsgaard und Storm, 1995; Abbott und Refsgaard, 1996). Im Bereich der hydrologischen Modelle sind vereinzelt OOA Ansätze zu erkennen, doch handelt es sich dabei um den hydrologischen Modellen eigenen modularen Aufbau der Systemelemente und nicht einer durchdachten OOA in IT-spezifischer Sicht. Die aktuellen Simulationsprogramme sind in der Regel zwar inhaltlich erweitert worden, aber ein Umstieg auf eine modernere Softwarearchitektur fand weitestgehend nicht statt.

Auch ist ein komponentenbasierter Ansatz im wasserwirtschaftlichen Bereich nicht zu erkennen. Es lässt sich zwar die Bildung von unterschiedlichen Modulen beobachten, doch sind diese nicht dafür konzipiert, miteinander zu kommunizieren, so dass nicht von einem komponentenbasierten Ansatz gesprochen werden kann. Der komponentenbasierte Ansatz wird aus der OOA abgeleitet und steht für die Entwicklung von einzelnen Komponenten, die jeweils spezifische Aufgaben übernehmen und als gesamte Komponente mit anderen Komponenten interagieren. Ein Vorteil der komponentenbasierten Architektur ist die Austauschbarkeit der einzelnen Komponente.

---

## **1.2 Zum Titel der Arbeit**

---

Der Titel dieser Arbeit stellt eine Kurzform der Beschreibung der Inhalte dieser Arbeit dar. Die Langform dieser Beschreibung lautet: „Ganzheitliche integrierte Modellierung heterogener, wasserwirtschaftlicher Systeme durch Einsatz generischer IT-Infrastrukturen“. Die Langform beinhaltet Schlagwörter, die an dieser Stelle näher erläutert werden sollen.

Was mit „Ganzheitliche integrierte Modellierung“ gemeint ist, wird in dem Kapitel 1.3 erläutert. Hinter der „Ganzheitlichkeit“ steht implizit eine Nachhaltigkeit im Sinne der IT-Strukturen, die durch den Einsatz standardisierter generischer Schnittstellen zur Kopplung abgebildet wird. Dadurch lassen sich Neuentwicklungen mit Altentwicklungen kombinieren.

Bei dem Textfragment „Heterogener, wasserwirtschaftlicher Systeme“ steht die Heterogenität zum einen für die Probleme bei der Kopplung von heterogener Modelldomänen. Zum anderen aber auch für die heterogenen Daten, die genutzt und ausgetauscht werden. Beispiele hierfür sind Konvertierungsaufgaben wie die Umrechnungen von Schmutzfracht in Schmutzkonzentration oder Namenszuordnungen (*mapping*) wie „Abfluss“ zu „Q“.

Hinter dem Begriff „generischer IT-Infrastrukturen“ steht die Nutzung generischer Schnittstellen und bestehender Standards zur Kopplung von Modellen unterschiedlicher (aber auch gleicher) Modelldomänen, die Kopplung von Datencontainern mit Modellen und die Kopplung von Auswertungswerkzeugen an die Modelle.

---

### 1.3 Hypothese und Fragestellungen

---

Trotz der seit Jahrzehnten andauernden Entwicklung der iM offenbaren sich Schwierigkeiten, die Modelldomänen miteinander zu verbinden. Wesentliche Gründe hierfür sind die Kopplung der Modelldomänen, der erhöhte Datenerfassungsaufwand bzw. der Detaillierungsgrad und die zugrunde liegende Interdisziplinarität.

**Die Hypothese dieser Arbeit ist: Es kann ein integriertes Modellsystem aufgebaut werden, das die Kopplung der Modelldomänen generisch abbildet, eine Daten-Modellkopplung implementiert und die Inter- bzw. Transdisziplinarität der integrierten Modellierung berücksichtigt!**

Um ein solches Modellsystem von den bisherigen prototypischen integrierten Modellsystemen abzugrenzen, wird das neu aufzubauende System im Folgenden als ganzheitliche integrierte Modellierung bezeichnet (giM). Dabei steht *integriert* für die fachliche Kopplung und *ganzheitlich* für die Erfassung der Arbeitsprozesse der Modellierung.

Da die iM ihre Anwendungsgrenzen nicht erreicht hat, muss eine giM zusätzlich um unbekannte Elemente erweiterbar sein. Daraus ergeben sich die in Tabelle 1.1 gezeigten Anforderungen an eine giM.

Da der Entwurf eines generischen Systems die Gefahr beinhaltet, durch Generalisierung die Detailprobleme so weit zu vernachlässigen, dass diese in der Abstraktionsebene nicht mehr berücksichtigt werden, muss ein prototypisches, real existierendes giM-System aufgebaut werden, welches das Gedankenmodell in ein implementiertes System überführt.

Der Bedarf einer giM liegt einerseits in der Forschung, bei der die miteinander interagierenden Modelldomänen immer wieder durch neue Prozesse infolge neuer Erkenntnisse erweitert werden müssen. Da die vorhandenen iM-Systeme in dem Punkt Erweiterbarkeit durch ihren meist proprietären Ansatz ein Defizit haben, wäre ein giM-System, das in der Architektur die Erweiterbarkeit bereits vorsieht, eine gute Basis für zukünftige Forschungsprojekte. Nicht zuletzt eröffnet die Berücksichtigung der Inter- bzw. Transdisziplinarität vollständig neue Forschungsfelder. So könnte bei Prognose- und Szenariosystemen beispielsweise eine neue Modelldomäne „Stadtentwicklung“ hinzugefügt werden, die mit der Modelldomäne „Kanalnetz“ interagiert. Eine weitere Anwendung liegt darin, dass durch das Hinzufügen der Daten-Modell-Kopplung ein Echtzeitkontrollsystem direkt auf Daten der Messstellen Zugriff erlangt, was für eine modellprädiktive Steuerung Vorteile hat.

Andererseits eröffnet ein giM auf der Seite des praktischen Einsatzes die Möglichkeit zum verteilten Arbeiten, so dass auf Modelldomänen spezifizierte Fachingenieure ihr Wissen durch kooperatives Arbeiten bündeln können, ohne Expertenwissen in anderen Modelldomänen erlernen zu müssen. Durch die Daten-Modell-Kopplung kann zudem eine Schnittstelle zu den Datenhaltungssystemen aufgebaut werden, die in Ingenieurbüros eingesetzt werden. Eine Anbindung von geografischen Informationssystemen (GIS) an einzelne Modelle ist bereits häufig realisiert. Eine direkte Kopplung von GIS an ein iM-System wäre aber wünschenswert und kann durch ein giM ermöglicht werden.



**Tabelle 1.1 Fragestellungen an ein ganzheitliches integriertes Modellsystem**

Fragestellungen an ein ganzheitliches integriertes Modellsystem	
Generische Kopplung von Modelldomänen	Gibt es Möglichkeiten, die Kopplung unterschiedlicher Modelldomänen generisch zu beschreiben? Existieren hierfür Standards oder Ontologien?
Daten-Modell-Kopplung	Wie können Eingangsdaten mit den Modellsystemen gekoppelt werden? Können diese unabhängig von unterschiedlichen Modelldomänen gleichzeitig genutzt werden? Gibt es Standards der Datenhaltung, die für Eingabe und Auswertung genutzt werden können?
Einsatz als inter- / transdisziplinäres Modellsystem	Inwieweit kann auf die Interdisziplinarität der integrierten Modellierung eingegangen werden? Können unterschiedliche Fachdisziplinen gemeinsam am Modell arbeiten?
Erweiterbar mit neuen Modelldomänen	Können neue Modelldomänen in das Modellsystem integriert werden? Können Modellansätze durch andere ausgetauscht werden (z. B. hydrologische Kanalnetzmodellierung durch hydrodynamische Kanalnetzmodellierung)?
Demonstration und Implementierung eines ganzheitlichen integrierten Modellsystems	Lässt sich ein Gedankenmodell der ganzheitlichen integrierten Modellierung auch in ein implementiertes System überführen? Wird die Heterogenität der Modelldomänen berücksichtigt? Gehen durch die Abstraktion der giM Detailprobleme verloren?

---

## **1.4 Gliederung der Arbeit**

---

In Kapitel 2 werden Begriffe erläutert, die in dieser Arbeit benutzt werden. Dieses Kapitel ist eigenständig und kann übersprungen werden bzw. es kann auch nur bei Bedarf auf die Definitionen der Begriffe zurückgegriffen werden. In Kapitel 3 werden die Grundlagen dieser Arbeit vorgestellt. Dabei wird unterschieden zwischen den ingenieurspezifischen Grundlagen der integrierten Modellierung (Kapitel 3.1) und den informationstechnisch geprägten Grundlagen (Kapitel 3.2). Des Weiteren werden in diesem Kapitel Sortierungen, Strukturierungen und Kategorisierungen der Grundlagen vorgenommen. Nachdem die Grundlagen erläutert wurden, folgt in Kapitel 4 die Vorstellung der Analyse und Methodik dieser Arbeit. In diesem Kapitel werden auch Fragestellungen in Bezug auf eine Realisierung einer ganzheitlichen Modellierung präzisiert. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Zusammenfassung der Analyse.

Kapitel 5 und Kapitel 6 widmen sich der Realisierung einer ganzheitlichen integrierten Modellierung. Dabei wird in Kapitel 5 der Modellentwurf vorgestellt und in Kapitel 6 die Umsetzung in ein reales System. Zur Demonstration des ganzheitlichen integrierten Modellsystems werden in Kapitel 6 zwei Fallbeispiele diskutiert. Die Zusammenfassung dieser Arbeit und einen Ausblick auf Einsatzmöglichkeiten und Erweiterungen bildet mit Kapitel 7 den Schluss dieser Arbeit.

---

## 2 Begriffe

---

„Jeder ist unwissend, jedoch auf verschiedenen Gebieten.“

(William Penn Adair "Will" Rogers)

In diesem Kapitel werden Begriffe erläutert, die in dieser Arbeit von zentraler Bedeutung und wichtig für das Verständnis sind. Es stellt damit ein eigenständiges Kapitel dar. Daher kann das Kapitel übersprungen werden und bei Bedarf auf die Unterkapitel der einzelnen Begriffe zurückgegriffen werden.

---

### 2.1 Modelldomäne

---

Die Herkunft des Begriffs Domäne ist das lateinische Wort *dominium* = Herrschaft oder Herrschaftsbereich von *dominus* = Herr. Domäne bezeichnet in der Informatik ein abgrenzbares Problemfeld. Auch andere Fachgebiete haben sich des Begriffs Domäne bedient. So wird Domäne im Bereich Wissensmanagement für *Fachgebiet* oder *Wissensgebiet* verwendet.

Der Begriff Modelldomäne ist eine eigene Wortschöpfung, die ein modellbezogenes Wissensgebiet bzw. Fachgebiet definiert. So ist z. B. ein Kanalnetzmodell ein Modell mit abgeschlossenem Wissensgebiet und damit eine Modelldomäne.

---

### 2.2 Begriffe der Softwareentwicklung

---

Diese Arbeit bedient sich einiger Technologien der Softwareentwicklung. Für ein besseres Verständnis sind nachfolgend ausgewählte Begriffe und Verfahren zusammengefasst.

---

#### 2.2.1 Entwurfsmuster – software pattern

---

Bereits zu Anfang der Geschichte der Softwareentwicklung ist eine strukturierte Planung des Softwareprodukts eingeführt worden. Diese Planung hatte zu Anfang das Ziel, den Programmcode und Datentransformationen zu minimieren, um möglichst wenige Ressourcen des Zielrechners zu beanspruchen. Im Laufe der Fortentwicklung der Softwareplanung ist der Fokus immer mehr hin zur einer besseren Beschreibung und Lösung einer Aufgabenstellung gerückt.

Dabei ist bemerkenswert, dass wesentliche Impulse aus dem Bauwesen gegeben wurden. So wurde der erste programmierbare Computer von einem Bauingenieur geplant und gebaut, um komplexe Berechnungen im Tiefbau durchzuführen (Zuse, 1936). Auch geht in der Softwareentwicklung zumindest teilweise das aktuelle Paradigma der Entwurfsmuster – der englische Begriff *design pattern* oder *software pattern* hat sich etabliert – gleichermaßen auf das Bauwesen zurück. Ein wichtiger Ideengeber war der Entwurf einer Mustersprache (engl. *pattern language*) für Architekturentwürfe (Alexander et al., 1977).

Die grundlegende Idee von *software patterns* ist die Wiederverwendbarkeit von Lösungen, die in zurückliegenden Projekten bereits entwickelt wurden. Gamma et al. (1995) (*gang of four* genannt oder GOF) formalisierten diese Lösungen zu kleinteiligen *pattern*, welche die häufigsten Anwendungsfälle der objektorientierten Softwareentwicklung abdecken. Diese *patterns* werden bis heute genutzt. Die *patterns* beziehen sich aber weniger auf die Softwarearchitektur, sondern mehr auf die Programmcode-spezifische Umsetzung. Um den Prozess des Architekturdiseigns zu unterstützen, wurden deshalb großteilige *patterns* formuliert (Fowler, 2002).

Im Folgenden werden zwei *software patterns* der GOF näher erläutert.

---

## Wrapper

---

Ein *wrapper* ist ein Entwurfsmuster der GOF. Das Klassendiagramm des Entwurfsmusters ist in Abbildung 2.1 gezeigt. Die Struktur eines *wrapper pattern* kann in vier Bestandteile untergliedert werden: (1) Den Auftraggeber (*Client*), der über eine definierte Schnittstelle auf die Wrapperklasse Zugriff nimmt. (2) Die vom Client verwendete Schnittstelle (in der Abbildung *Ziel*). (3) Die zu adaptierende Klasse, welche die Funktionalität besitzt, auf die der Klient letztendlich Zugriff erhalten will. (4) Der Adapter oder *wrapper*, der die vermittelnde Funktion übernimmt und von der Zielklasse zu der zu adaptierenden Klasse weiterleitet.

Das Entwurfsmuster des *wrappers* eignet sich z. B. für den Zugriff auf bereits existierende Programmpakete, die in einer anderen Programmiersprache implementiert wurden (siehe Abbildung 2.2). Hier wird die Namensgebung deutlich, da der *wrapper* die zu adaptierende Klasse einpackt (engl. to wrap).

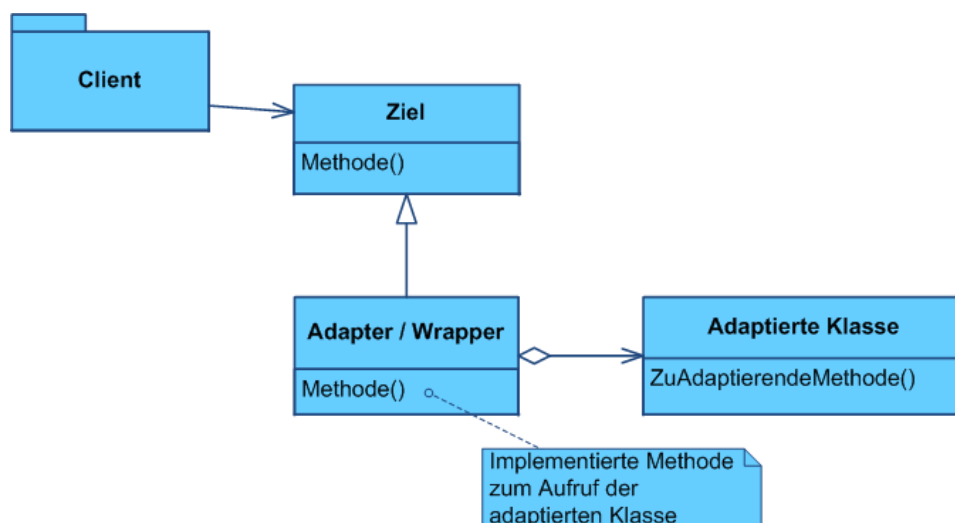


Abbildung 2.1 Klassendiagramm des Entwurfsmusters wrapper

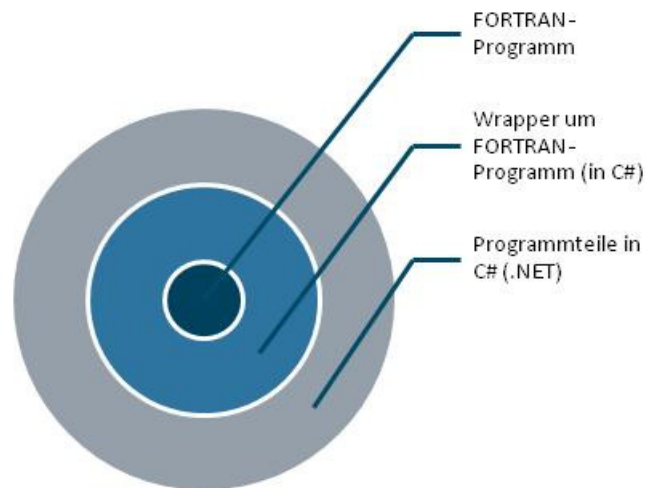


Abbildung 2.2 Wrapper als sprachenübergreifender Adapter (von Fortran nach C#)

## strategy pattern

Das *strategy pattern* ist auch ein Teil der Entwurfsmuster der GOF. In Abbildung 2.3 ist das Klassendiagramm des Entwurfsmusters gezeigt.

Die Klasse *Strategie* definiert dabei ausschließlich eine Schnittstelle für alle unterstützten Algorithmen. Die Implementierung der eigentlichen Algorithmen übernehmen die konkreten *Strategieklassen* (z. B. „Konkrete Strategie A“).

Der Kontext hält und verwaltet die Schnittstelle *Strategie*, hinter der eine konkrete Strategie liegt. Damit kann der spezifische Algorithmus über die Schnittstelle verwendet werden.

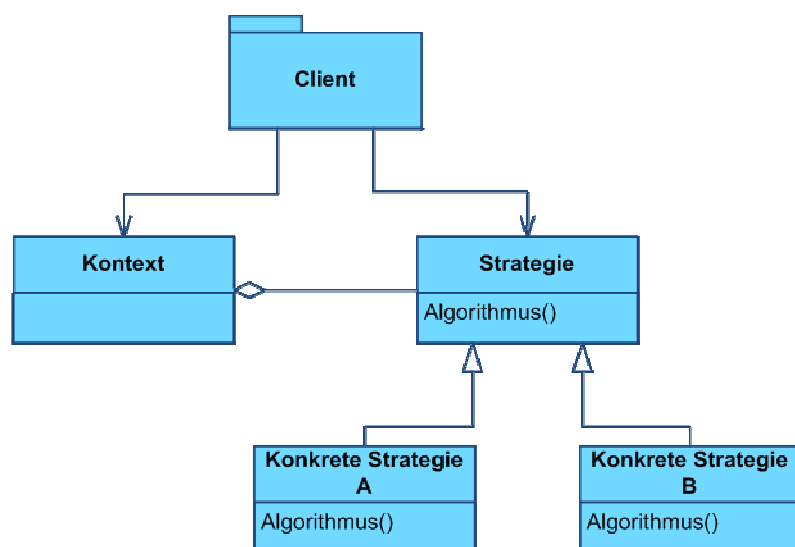


Abbildung 2.3 Klassendiagramm des Entwurfsmusters strategy patterns

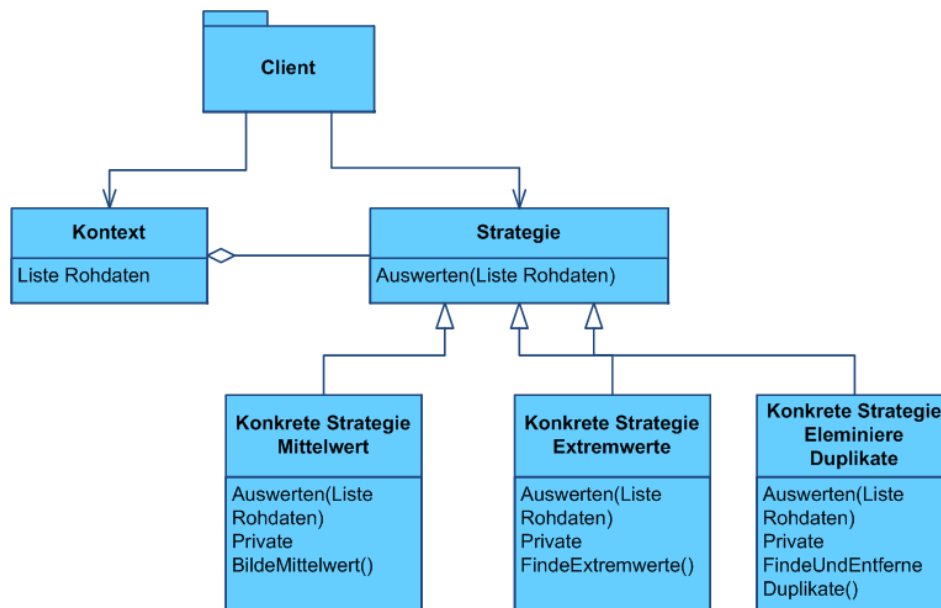


Abbildung 2.4 Beispiel für *strategy pattern*

Welche konkrete Strategie instanziiert wird und damit von der *Kontextklasse* genutzt wird, legt in der Regel nicht in der *Kontextklasse* selbst fest, sondern die Instanzierung wird meist mittels des Fabrik-Entwurfsmusters (ein weiteres Muster der GOF) übernommen. Dieses Muster wird allerdings in dieser Arbeit nicht weiter erläutert.

Ein großer Vorteil des Entwurfsmusters *strategy pattern* liegt in der Austauschbarkeit der konkreten Strategien, ohne die Schnittstellen verändern zu müssen.

Ein Beispiel für einen sinnvollen Einsatz ist die Auswertung von Daten (siehe Abbildung 2.4). Hier wäre die *Kontextklasse* eine Klasse, die Rohdaten enthält und diese auswerten möchte. Dazu ruft sie die Methode *Auswerten()* der *Strategy-Klasse* auf. Je nach dem welche konkrete Klasse als Strategie genutzt wird, können die Rohdaten unterschiedlich ausgewertet werden. Im Beispiel gibt es die konkreten Strategien der Mittelwertbildung, der Extremwertbildung und der Entfernung von Duplikaten in den Rohdaten.

---

## 2.2.2 Komponentenbasierte Softwareentwicklung

---

Der Grundgedanke einer komponentenbasierten Softwareentwicklung ist die Modularisierung der Aufgaben in einzelne Komponenten. Dadurch sind die einzelnen Komponenten wiederverwendbar und können aneinander angebunden werden (Heineman und Councill, 2001). Durch die Unterteilung von Anwendungen in wiederverwendbare Komponenten ist es möglich, einzelne Komponenten neu zu entwickeln und Komponenten mit anderen Komponenten auszutauschen, ohne Anpassungen in weiteren Komponenten vornehmen zu müssen. Bei konsequenter Einhaltung dieses Prinzips können nach dem Baukastenprinzip neue Anwendungen zusammengestellt werden.

Ein weiterer Vorteil neben der Zeitersparnis bei der Entwicklung ist eine erhöhte Qualität der einzelnen Komponenten, da diese einzeln auf ihre Funktionalität hin getestet werden können.

---

Dieses Prinzip des Qualitätsmanagements wird z. B. konsequent bei sogenannten Unit-Tests durchgeführt (Crispin und Rosenthal, 2002).

---

## 2.3 Medienbruch

---

Der Begriff Medienbruch stammt aus der Informationstechnologie. Wechselt das informationstragende Medium innerhalb eines Informationsbeschaffungs- oder Informationsverarbeitungsprozesses, so wird dies als Medienbruch bezeichnet. Ein Medienbruch in der Wasserwirtschaft tritt z. B. bei der Übertragung handschriftlicher Aufzeichnungen von Messungen in ein elektronisches Format (z. B. Excel) auf.

Im Allgemeinen wird durch einen Medienbruch in der Informationskette der Beschaffungs- oder Verarbeitungsprozess für Daten, Informationen und Inhalte erschwert, verlangsamt und unter Umständen auch in seiner Qualität gemindert.

Der Begriff Medienbruch bezieht sich in erster Linie auf das physische Medium (Papier, CD, Bildschirm, etc.), kann aber auch auf elektronische Medien ausgeweitet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Datenüberführung von Excel-Sheets in Datenbanken. Um dies gegenüber dem klassischen Medienbruch abzugrenzen, kann dies als virtueller Medienbruch bezeichnet werden.

---

## 2.4 Standard

---

Ein Standard ist eine Norm oder Regel im Sinne einer Vereinheitlichung. Eine für diese Arbeit passende Definition liefert das British Standard Institute: *„Ein Standard ist ein öffentlich zugängliches technisches Dokument, das unter Beteiligung aller interessierter Parteien entwickelt wird und deren Zustimmung findet. Der Standard beruht auf Ergebnissen aus Wissenschaft und Technik und zielt darauf ab, das Gemeinwohl zu fördern.“* (BSI, 2010)

Im Bereich der Informationstechnologie (IT) werden Standards in starkem Maße genutzt, da hier Schnittstellen spezifiziert werden, die dann von Anwendungen aus genutzt werden können. Ein typischer Vertreter eines Standards in der IT ist das ASCII-Format. Hinter ASCII steht *„American Standard Code for Information Interchange“*, in dessen Standard eine Zuordnung von Zeichen, Ziffern und Buchstaben mit repräsentativen binären Werten vorgenommen wird.

---

## 2.5 Ontologie

---

Die Ontologie ist originär eine Disziplin der theoretischen Philosophie, bei der es sich um allgemeine Begriffsverwendung handelt. Dabei wird eine Systematik grundlegender Typen von Entitäten (Gegenstände, Eigenschaften, Prozesse) und ihrer strukturellen Beziehungen diskutiert. Ein ontologischer Grundbegriff ist beispielsweise eine Kategorie.

Eine streng formale Definition von Beziehungen und Begriffen ist in der Informationstechnologie nötig, um eine Problemstellung zu definieren. Um dies zu beschreiben, hat sich die Informatik des Begriffs der Ontologie bedient. Der Begriff Ontologie wird in der Informatik für sprachlich gefasste und formal geordnete Darstellungen einer Menge von Begrifflichkeiten

---

und der zwischen ihnen bestehenden Beziehungen in einem bestimmten Gegenstandsbereich verwendet. Ontologien werden dazu benutzt, Wissen in digitalisierter und formaler Form zwischen Anwendungsprogrammen und Diensten auszutauschen. Wissen umfasst dabei sowohl Allgemeinwissen als auch Wissen über sehr spezielle Themengebiete und Vorgänge (Guarino, 1998).

Da Ontologien in der IT eine hohe Bedeutung haben, sind formale Sprachen entwickelt worden, wie diese Ontologien für Informationssysteme formuliert werden können. Ein wichtiger Vertreter ist dabei die *Web Ontology Language* (kurz OWL) (Horrocks et al., 2003). Vertreter von Ontologien im Bereich der Wasserwirtschaft sind das "Integrierte DV-System-Bauwesen" ISYBau (Bund, 1991) oder die Ontologie WaterML (Valentine et al., 2007).



---

## 3 Grundlagen

---

*„Plant das Schwierige da, wo es noch leicht ist. Tut das Große da, wo es noch klein ist. Alles Schwere auf Erden beginnt stets als Leichtes. Alles Große auf Erden beginnt stets als Kleines.“*

*(Laotse)*

In diesem Kapitel werden die Grundlagen beschrieben, mit deren Hilfe ein ganzheitliches integriertes Modellsystem entworfen werden kann. Das Kapitel untergliedert sich in zwei Hauptteile, den ingenieurtechnischen Teil, der die integrierte Modellierung in den Vordergrund stellt, und den informationstechnischen Teil, der die Techniken zur Kopplung und die vorhandenen Standards der Datenhaltung erläutert.

---

### 3.1 Integrierte Modellierung

---

Mit integrierter Modellierung (iM) ist in dieser Arbeit die iM urbaner wasserwirtschaftlicher Systeme gemeint. Schon in den 70er Jahren wurde erkannt, dass die Interaktionen der urbanen Abwassersysteme, des Gewässers und der natürlichen Flächen nicht getrennt, sondern integriert zu betrachten seien (Metcalf und Eddy, 1971; Beck, 1976; Ostrowski und Alsenz, 1990). Bezogen sich diese Aussagen damals noch auf die hydraulischen Einflüsse, sind in den 90er Jahren Anforderungen bezüglich der stofflichen Aspekte hinzugefügt worden (Novotny und Witte, 1997; Rauch und Harremoës, 1996, 1999; Wittenberg, 1992).

Die Hauptproblematik bei der Modellierung der Hydraulik in der iM ist durch die zeitlichen Skalenprobleme der Kopplung geprägt. Durch das Hinzufügen des Bereichs der Gütemodellierung wird die Komplexität der iM gegenüber der reinen hydraulischen Modellierung um ein Vielfaches gesteigert. So kommen zu den zeitlichen Skalenproblemen die Konvertierungen bzw. die Fraktionierung der Stoffe an den Schnittstellen der Modelldomänen hinzu (Volcke et al., 2006). Zudem wird die Frage des Detaillierungsgrads der einzelnen Modelle wichtig, welcher bei allen betrachteten Modellen aneinander angepasst sein muss (Crout et al., 2009). Beispielsweise ist eine detaillierte Kläranlagensimulation mit 20 Stoffgruppen, die vom Kanalnetzmodell 5 Stoffgruppen übergeben bekommt, zumindest in Bezug auf den Wechsel des Detaillierungsgrades fragwürdig (Vanrolleghem et al., 2005a). Die Suche nach einer Antwort auf den Detaillierungsgrad der betrachteten Modelle ist aktuelle Thematik der Forschung – was kann weniger detailliert und was muss detaillierter betrachtet werden (HSGSim, 2008). Anders formuliert ist eine iM insgesamt so aussagekräftig wie ihre schwächste Kopplungsstelle (Kamp und Savenije, 2007).

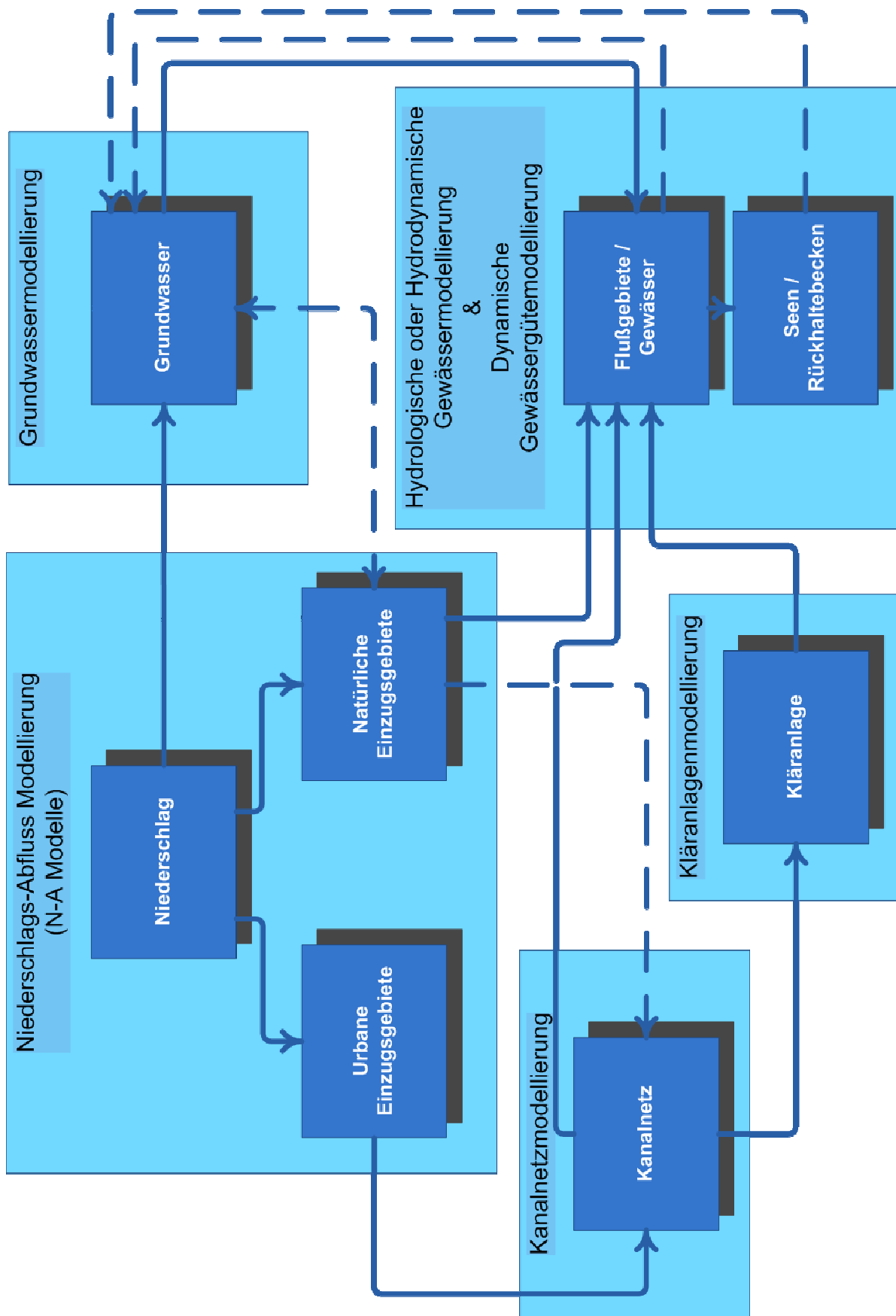


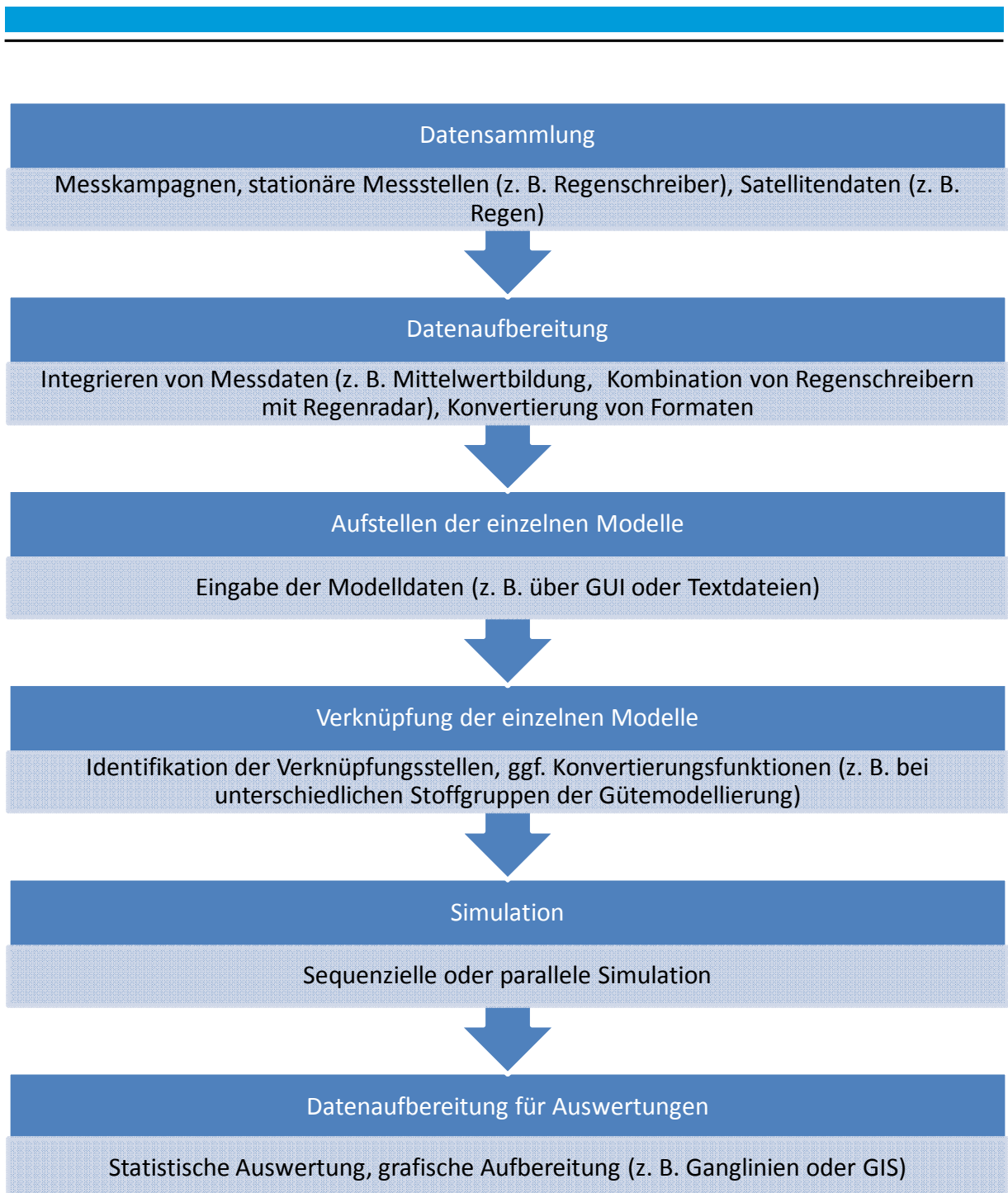
Abbildung 3.1 Teilbereiche der integrierten Modellierung (nach (Reußner und Heusch, 2008))

Was genau wird unter iM verstanden? Eine Definition der iM ist die Kopplung von mindestens zwei Modelldomänen (Rauch et al., 2002). Welche Modelldomänen der Urbanhydrologie miteinander gekoppelt werden, spielt in dieser Definition keine Rolle. Aus diesem Grund sind auch die bisher umgesetzten iM-Systeme grundsätzlich verschieden. Eine Übersicht, welche Modelldomänen zu dem Bereich der iM in der Urbanhydrologie gehören, ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

In Abbildung 3.1 sind die wichtigsten Beziehungen der Teilbereiche angedeutet. Welche Interaktionen dabei vorrangig sind, listet Tabelle 3.1 auf.

**Tabelle 3.1 Interaktion der Modelldomänen der integrierten Modellierung**

Modell- domänen	NA-Modell mit ...	Kanalnetz mit ...	Gewässer mit ...	Kläranlage mit ...	Grundwasser mit ...
NA-Modell		Keine	Keine	Keine	Beeinflusst Abfluss- bildung
Kanalnetz	Oberflächen- abfluss		Keine	Nur bei Steuerung	Fremd- wasser
Gewässer	Oberflächen- abfluss	Entlastung		Einleitung	Zwischen- abfluss
Kläranlage	Keine	Abfluss	Nur bei Steuerung		Keine
Grundwasser	Infiltration	Verluste	Zwischen- abfluss	Keine	



**Abbildung 3.2 Arbeitsschritte der integrierten Modellierung**

In Abbildung 3.2 sind die Arbeitsschritte dargestellt, die bei der integrierten Modellierung anfallen. Neben der eigentlichen Simulation und dem Aufstellen eines iM-Systems nimmt die Auf- und Nachbereitung der Daten einen großen Stellenwert ein, auch weil dort in der Regel ein Medienbruch stattfindet. In der Vergangenheit hat sich die Forschung kaum mit diesen Arbeitsschritten befasst, erst in der jüngeren Vergangenheit gibt es Arbeiten zu diesem Thema (Jagers, 2010; Knapen et al., 2009, 2010; Henson et al., 2009; Donchyts und Jagers, 2010; Piasecki et al., 2010; Crooks und Naden, 2007).

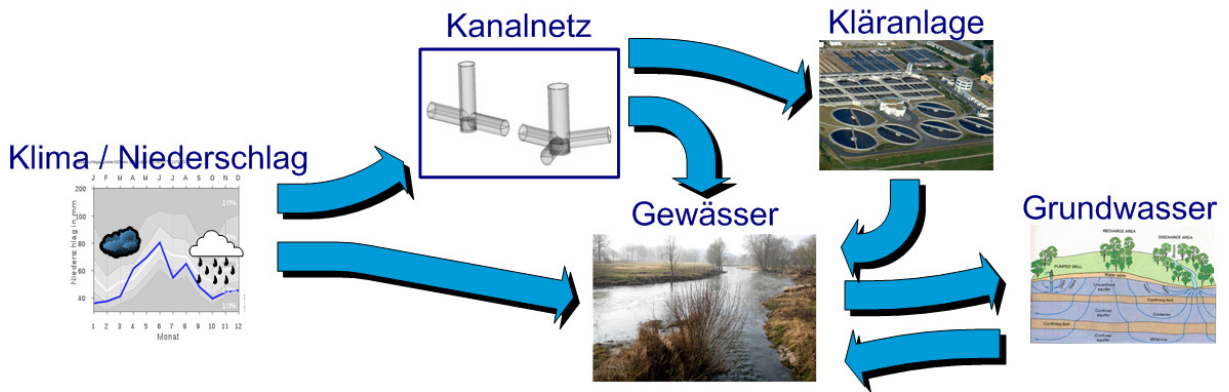


Abbildung 3.3 Wichtigste Modelldomänen der integrierten Modellierung

Im folgendem Kapitel werden die einzelnen Teilbereiche der iM beschrieben. Danach wird auf die Datenauf- und -nachbereitung eingegangen. Abschließend werden die für eine Implementierung eines giM-Systems verwendeten Modelle beschrieben.

### 3.1.1 Modelldomänen der integrierten Modellierung

Die vorwiegenden Modelldomänen der iM sind: (1) Kanalnetzmodell, (2) Kläranlagenmodell, (3) Gewässermodell, (4) Grundwassermodell und das Niederschlags-Abfluss-Modell (siehe auch Abbildung 3.3). Das N-A-Modell ist in der Regel in einem Kanalnetzmodell, Gewässermodell oder Grundwassermodell verankert. Auch die Gütemodellierung des Kanalnetzes oder des Gewässers ist meist direkt in der jeweiligen Modelldomäne integriert.

#### N-A-Modellierung

Die Niederschlags-Abfluss-Modellierung bildet die Abflussbildung durch den Niederschlag und nachfolgend die Abflusskonzentration ab. Dabei können die Modellansätze der Abflussbildung in zwei unterschiedliche Kategorien einsortiert werden: 1. Abflussbildung der undurchlässigen Flächen und 2. Abflussbildung der durchlässigen Flächen. Die Abflusskonzentration wird meist mittels linearer Ersatzsysteme (z. B. Einzellinearspeicher) abgebildet. Im Grunde ist die N-A-Modellierung keine eigenständige Modelldomäne mehr, da sie zur Belastungsbildung schon jetzt eng an die Modelldomänen Kanalnetz-, Grundwasser- und Gewässermodellierung gekoppelt ist.

#### Kanalnetzmodellierung

Es können zwei Arten der Kanalnetzmodellierung unterschieden werden: die hydrodynamische und die hydrologische Kanalnetzmodellierung. Die hydrodynamische Modellierung wird überwiegend für die Dimensionierung der Haltungen genutzt. Sie ist jedoch aufwendiger in Bezug auf die Modellerstellung und die Simulation als die hydrologische Modellierung. Aus diesem Grund werden hydrologische Modelle zur Beurteilung der Entlastungen (Regenüberläufe, Becken etc.) insbesondere in stofflicher Hinsicht genutzt. Die hydrologischen Modelle haben hier durch die kürzeren Simulationszeiten den Vorteil, dass eine große Bandbreite von

---

Belastungsregen (bis hin zu historischen Regenreihen von mehr als 10 Jahren) untersucht werden kann.

Die Gütemodellierung wird meist mit vereinfachten Ansätzen simuliert. So verwendet beispielsweise das Modell SWMM einen einfachen Bioreaktor oder das Modell SMUSI einen reinen Translationsansatz mit Absetzwirkung (Verworn, 1999).

---

## **Gewässermodellierung**

---

Für die Gewässermodellierung werden überwiegend hydrodynamische Modelle verwendet. Diese unterscheiden sich bezüglich der numerischen Methoden (Finite Differenzen, Finite Volumen, Finite Elemente) und in ihrem Detaillierungsgrad der räumlichen Dimensionen. So werden für küstennahe Fließgewässer 2D oder 3D Modelle verwendet, aber auch 1D Modelle kommen bei mittelgroßen Gewässern zum Einsatz.

Neben den hydrodynamischen Gewässermodellen gibt es hydrologische Ansätze, das Gewässer abzubilden, die sich durch ihre, im Verhältnis zu den hydrodynamischen Modellen, schnelleren Simulationszeiten für Prognosesysteme eignen. Das hydrologische Gewässermodell arbeitet für Gewässerstrecken überwiegend mit Ersatzsystemen wie Speicherkaskaden (Ostrowski, 1992).

---

## **Gewässergütemodellierung**

---

Die Gewässergütemodellierung umfasst eine große Bandbreite an Ansätzen, wie diese modelliert werden kann. Diese reichen von einfachsten stationären Ansätzen wie Streeter-Phelps (Streeter und Phelps, 1925) bis hin zu instationären Ansätzen, welche die komplexen Stoffprozesse mittels Differenzialgleichungen (DGL) in Reaktoren abbilden (Shanahan et al., 2001). Die Beschreibung der DGL wird meist mittels einer sogenannten Gujer-Matrix-Notation (Stoffgruppen/Güteprozesse) beschrieben (Vanrolleghem et al., 2005b).

Um neben den stofflichen Prozessen auch die Einwirkung der Hydraulik zu berücksichtigen, gibt es den Ansatz LaPipe, der die Hydraulik in ein Ersatzsystem überführt (Muschalla und Alex, 2010). Dieses Ersatzsystem basiert auf einem Lagrang'schen Bezugssystem, ähnlich einem Plugflow (Pfropfenströmung) (Blair und Crowther, 1929), bei dem die einzelnen transportierten Volumenkörper als Reaktoren definiert werden (Bach et al., 2009; Brehmer et al., 2009; Reußner et al., 2009).

---

## **Kläranlagenmodellierung**

---

Die Kläranlagenmodellierung befasst sich mit der Simulation der stofflichen Umwandlungsprozesse, die in einer Kläranlage stattfinden. Dadurch, dass die Prozesse meist komplexer Natur sind, finden dementsprechend detaillierte Modelle ihre Anwendung. Eine der gebräuchlichsten Abbildungen der stofflichen Prozesse sind die Belebtschlammmodelle (*Activated Sludge Models*) ASM1, ASM2 und ASM3 (Henze, 2000), deren Simulation aufwendig ist.

---

## Grundwassermodellierung

---

Die Grundwassermodellierung wird meist mittels numerischer Methoden wie Finite Elemente Methode oder Finite Volumen Methode umgesetzt. Diese setzt ein gutes Wissen über die Struktur der Grundwasserstockwerke und die Bodenstruktur voraus. Die Datenerfassung ist aus diesem Grund für ein Grundwassermodell aufwendig.

Eine Kopplung in ein iM-System ist bisher kaum realisiert worden, da zum einen die Datenerfassung aufwendig ist und zum anderen die Verknüpfungspunkte bzw. -flächen zu den anderen Modelldomänen komplex sind.

---

### 3.1.2 Daten und Datenaufbereitung

---

Ein bisher kaum beachteter Bereich der iM ist die Behandlung von Daten. Durch die Komplexität der iM entsteht ein wesentlich höherer Bedarf an Daten, um ein integriertes Modell aufstellen zu können (HSGSim, 2008). Neben den Daten für jedes einzelne Teilmodell sind auch Informationen über die Schnittstellen wichtig.

Die Daten lassen sich in unterschiedliche Kategorien aufteilen, die in Abbildung 3.4 dargestellt sind.

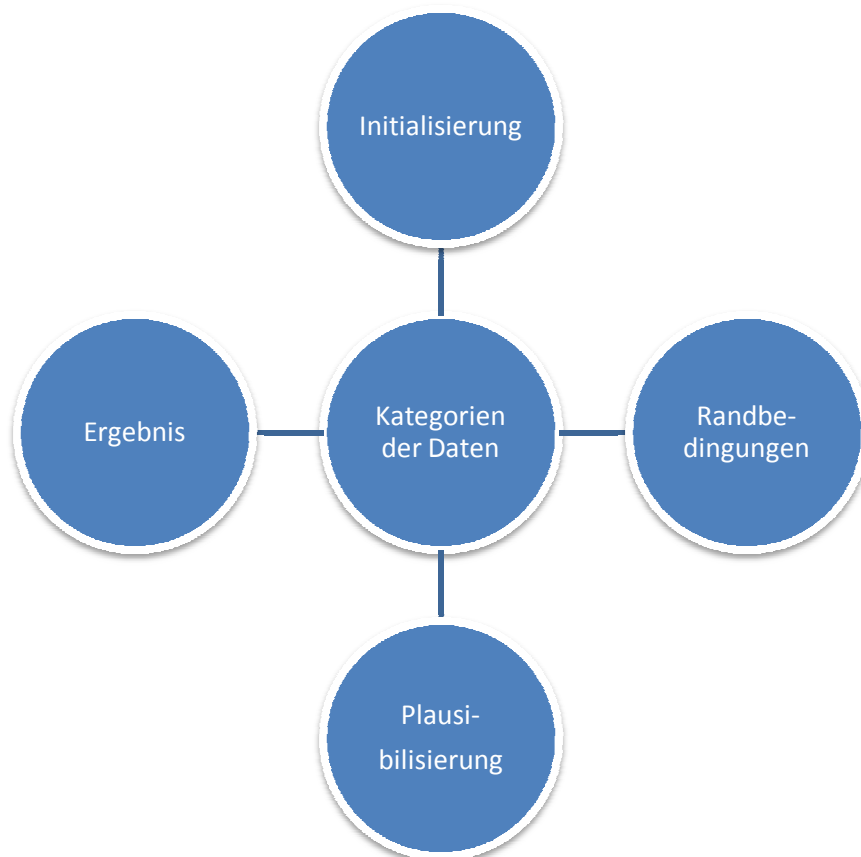


Abbildung 3.4 Kategorien der Modelldaten in der integrierten Modellierung

---

Mit Initialisierungsdaten der Modelle sind Daten gemeint, mit deren Hilfe ein Modell aufgestellt werden kann oder die als Anfangsbedingungen genutzt werden. Die Daten werden nicht (oder nur geringfügig) über dem Simulationszeitraum verändert. Typische Vertreter dieser Kategorie in der iM sind Geometriedaten für das Gewässer (Querprofile, Gefälle, Gewässer-verlauf, etc.) oder Bodenkennwerte (Landnutzung, Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$ , Fläche).

Die Kategorie „Randbedingungen der Modelle“ umfasst alle Eingangsdaten in ein Modell, die während der Simulationszeit variabel sind. Vertreter dieser Kategorie sind Niederschlagsin-formationen (in Form von Regenschreiber- oder Regenradardaten), Stoffkonzentrationen von nicht modellierten oberliegenden Gewässern oder Gewässertemperatur.

Die Plausibilisierungsdaten werden genutzt, um die Plausibilität der Ergebnisse eines Modell-systems zu überprüfen oder ein Modellsystem zu kalibrieren. Dafür werden beispielsweise Pegelmessungen und Gütemessungen im Gewässer herangezogen.

Ergebnisdaten sind Daten, die aus Simulationen von Modellen hervorgehen. Die Ergebnisda-ten werden nach einer Simulation ausgewertet und visualisiert. Zum Teil werden diese auch genutzt, um die Plausibilität von weniger detaillierten Modellsystemen zu prüfen, z. B. kann bei dem Aufstellen von hydrologischen Kanalnetzmodellen ein hydrodynamischen Modells für eine Kalibrierung genutzt werden. In diesem Fall wechselt dann die Kategorie von Ergebnisda-ten zu Plausibilisierungsdaten.

Die benötigten Daten liegen meist in unterschiedlichen Formaten vor. Die Bandbreite geht hier von datenbankbasierten Speicherungen über ASCII-Dateien bis hin zu binären Datenfor-maten. In Tabelle 3.2 sind ausgewählte Datenformate, deren Nutzung sowie Informationen zu etwaig vorhandenen Metadaten, aufgelistet. Mit Metadaten sind die Informationen bezüglich physikalischer Einheiten, geografischer Lage, Messgenauigkeit usw. gemeint.



**Tabelle 3.2 Ausgewählte Datenformate**

Anwendung	Datenformate	Nutzung	Geografische Lage	Meta-informationen
SMUSI Regenreihen	ASCII-Datei	Zeitreihen zum Einlesen des Niederschlags	Nein	Implizit Daten müssen immer in [mm/5min] angegeben werden
DWD (*5mn)	ASCII-Datei	Zeitreihen (z. B. Niederschlag)	In anderer Datei	Nein
BlueM.SIM (*BIN)	Binärdatei	Zeitreihen z. B. Nieder- schlag	Nein	Implizit werden immer gleich interpre- tiert
CORINE	Datenbank / GIS	Bodennutzun- gen	Ja	Ja
HLUG (*all)	ASCII-Datei	Zeitreihen zum Einlesen des Niederschlags	Ja	Ja
netCDF	Binärdatei	Zeitreihen z. B. Nieder- schlag	Frei definierbar	Frei definierbar

---

Bisher hat sich kein spezieller Standard zur Datenhaltung durchgesetzt. Es gibt zwar durchaus Standards bei einzelnen Datenarten (wie z. B. Niederschlagsdaten des DWD), doch werden diese Standards kaum für andere Datenarten oder von anderen Datenlieferanten genutzt. Dies führt dazu, dass es auf Seiten der gemessenen Daten eine Vielzahl an Formaten gibt. Eine Nutzung von gemeinsamen Standards gibt es in der Regel nicht.

Auf Seiten der Simulationssoftware gibt es ähnlich viele Formate, wie es Simulationssoftware gibt. Dies liegt daran, dass jede Simulationssoftware ihre Eingangsdaten in einem eigenen proprietären Format verlangt. In der Praxis haben die Anwender der Software eigene Konvertierungsmethoden entwickelt, die von externer Seite erhaltenen Eingangsdaten in das proprietäre Format der angewendeten Simulationssoftware überführen (z. B. Niederschlagszeitreihen aus dem DWD-Format nach SMUSI-Format).

Allen genutzten Daten ist gemeinsam, dass sie sich auf räumliche Dimensionen beziehen und damit im Prinzip georeferenzierbar sind. Ein Großteil der Daten ist allerdings nicht in einem einheitlichen Format georeferenziert. Ausnahmen hiervon sind Daten, die in GIS vorgehalten werden (z. B. CORINE). In der praktischen Anwendung geht diese einheitliche Georeferenzierung verloren, da die Daten aus dem GIS mithilfe von Exportfunktionalitäten in die proprietären Datenformate der Simulationssoftware überführt werden.

---

### 3.1.3 Modellkopplung

---

Die Modellkopplung ist einer der zentralen Punkte dieser Arbeit. Was genau ist Modellkopplung? Bei dem Prinzip Modellkopplung werden zwei (oder mehr) unterschiedliche (oder gleiche) Modelldomänen miteinander verknüpft, so dass diese uni- (oder bi-) direktional Informationen austauschen können.

Eine wesentliche Unterscheidung der Kopplung kann anhand des Programmcodes spezifischer Umsetzung vorgenommen werden. Nach Reußner und Heusch (2008) wird unterschieden zwischen (1) direkter Kopplung in einem Softwaresystem – bezeichnet als *Supermodel* – und (2) Kopplung von aufgeteilten Softwaresystemen – bezeichnet als *Interfaced Model*. Die Namensgebung ist der Kläranlagensimulation entlehnt, welche die Behandlung von unterschiedlichen Stoffgruppen im Gesamtsystem Kläranlage charakterisiert (Volcke et al., 2006).

Eine weniger gebräuchliche dritte Art der Modellkopplung ist die Überführung der Teilmodelle in Ersatzsysteme. Diese Ersatzsysteme werden miteinander gekoppelt. Einen interessanten Ansatz zur iM mit dieser Art der Modellkopplung beschreiben Kamp und Savenije (2007), bei dem sie die hydrologischen, hydrodynamischen und ökologischen Teilmodelle mit unterschiedlichen Zeitschritten in ein Ersatzsystem überführen, so dass die Kopplung in diesem Ersatzsystem als *Supermodel* abgebildet werden kann, bei der die unten beschriebenen Nachteile des *Supermodels* minimiert werden. Als Ersatzsystem werden z. B. neuronale Netze gebildet, die mit den Ergebnissen der Teilsystemsimulationen antrainiert werden.

Bei dem Konzept des *Supermodels* werden die unterschiedlichen Teilgebiete der Modellierung in einer einzigen Modellsoftware zusammengefasst. Skalenprobleme werden direkt im Gesamtsystem angepasst. Nachteil des *Supermodels* ist, dass mit zunehmender Integration von weiteren Modelldomänen eine immer aufwendigere Anpassung nötig ist, so dass eine große

---

und zunehmend komplexe Quellcodebasis entsteht. Diese Codebasis ist wiederum wegen seiner Komplexität schwieriger zu erweitern, so dass eine Weiterentwicklung aufwendiger wird, je mehr Modelldomänen betrachtet werden (Volcke et al., 2006).

Das Konzept des *Interfaced Model* sieht vor, dass die Modelldomänen in eigenen Softwarekomponenten implementiert werden. Diese kommunizieren über Schnittstellen (englisch Interface) miteinander. Die Kommunikation kann entweder asynchron oder synchron sein. Bei asynchroner Kommunikation werden die Simulationen nacheinander ausgeführt und die zu koppelnden Ergebnisse als Eingangsdaten an eine andere Komponente übergeben. Ein Beispiel hierfür ist das Erzeugen einer Abflusszeitreihe eines Sonderbauwerks mit einem Kanalnetzmodell, die dann von einem Gewässermodell als Zeitreihe eingelesen wird. Diese Art der Kopplung wird sequentielle Kopplung genannt (Erbe et al., 2002). Nachteil dieser Kopplungsart ist, dass eine bidirektionale Kopplung aufwendig ist, da dies eine Iteration der kompletten Simulationsläufe bedeutet. Des Weiteren müssen die Ergebnisse in der Regel umformatiert werden, um sie als Eingangsdaten zu nutzen, was u. U. einen Medienbruch bedeutet.

Eine Möglichkeit, bidirektionale Kopplungen zu berücksichtigen, ist die Steuerung der Kommunikation über ein übergeordnetes Meta-Modell – z. B. mit dem OpenMI-Framework (Gregersen et al., 2007). In diesem Fall werden die Informationen parallel zur Simulation ausgetauscht. Aus diesem Grund ist eine bidirektionale Kopplung durch Iteration des simulierten Zeitschritts möglich. Diese Art der Kopplung kann deshalb parallele Kopplung genannt werden.

Der Vorteil des Konzepts des *Interfaced Model* liegt in der Methodik, weitere Modelldomänen anzubinden. Ein Nachteil ist, dass Skalenprobleme direkt an den Schnittstellen gelöst werden müssen.

Liebiga et al. (2001) unterscheiden bei einem *Interfaced Model* die Modellkopplung und die Simulation bzw. die Lösung der numerischen Gleichungen in mehreren Kategorien. So bezeichnen sie die Zusammenfassung der mathematischen Beschreibung aller Teilmodelle und die Lösung mit einem gemeinsamen Integrationsalgorithmus als *One-Solver-Solution*. Findet hingegen die Lösung in den jeweiligen Teilmodellen statt, so sprechen sie von einer *Multi-Solver-Solution*. Hydrologische Modelle sind in der Regel auch ohne die Kopplung mit anderen Modellen eine *Multi-Solver-Solution*, da das System in Teilsysteme zerlegt wird, die dann einzeln gelöst werden.

In Abbildung 3.5 sind die beschriebenen Arten der Modellkopplung zusammengefasst.

Neben den Arten der Kopplung kann die Modellkopplung anhand der verknüpften Komponenten kategorisiert werden. In Abbildung 3.6 ist ein typisches iM-System dargestellt. Neben der Kategorie Modell-Modell-Kopplung (in der Grafik mit blauen Pfeilen) gibt es die Daten-Modell (graue Pfeile) und die Modell-Daten-Kopplung (dunkelblaue Pfeile).

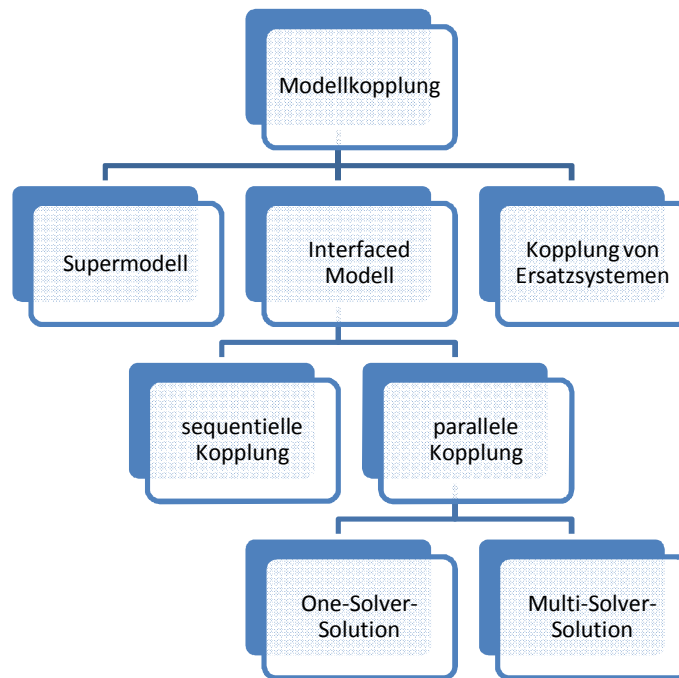


Abbildung 3.5 Arten der Kopplung

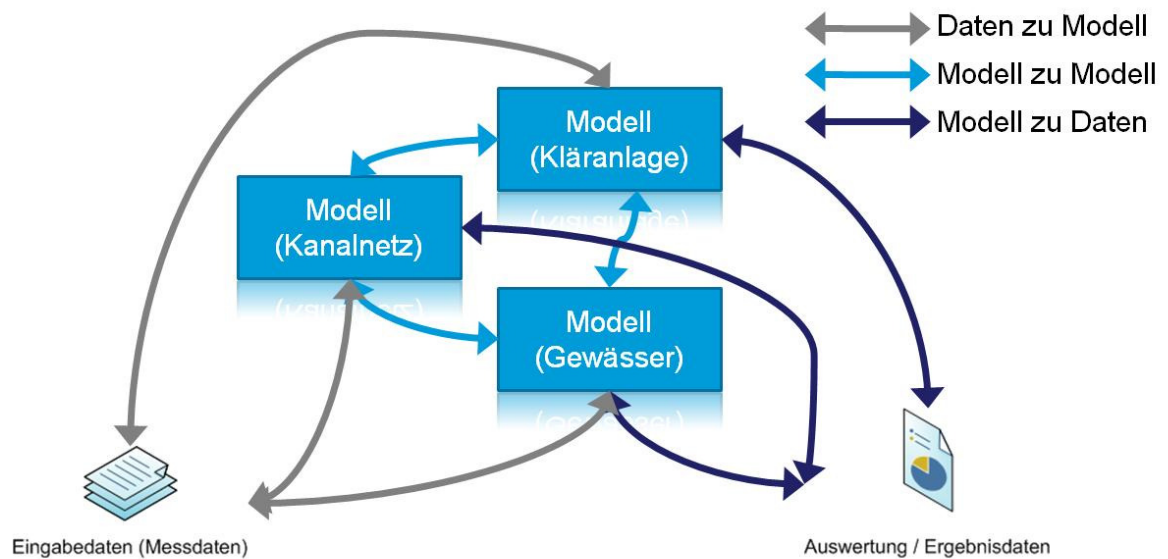


Abbildung 3.6 Interaktionen und Kategorien der Kopplung von Domänen und Daten

---

Die Modell-Modell-Kopplung ist im ersten Teil dieses Kapitels beschrieben. Die Daten-Modell-Kopplung beschreibt die Anbindung der Eingangsdaten in ein Modell. Die Daten-Modell-Kopplung verknüpft somit Daten der Kategorien „Initialisierungsdaten der Modelle“ und „Randbedingungen der Modelle“ mit den Modellen. Die Modell-Daten-Kopplung beschreibt die Schnittstelle zwischen Modell und den erzeugten Ergebnisdaten. Die angebundenen Daten der Modell-Daten-Kopplung sind damit der Datenkategorie „Ergebnisdaten“ zuzuordnen.

Bei der Daten-Modell-Kopplung werden Modelle und Datenerzeuger wie Messstellen gekoppelt, und bei der Modell-Datenkopplung stehen den Modellen Datenauswertungswerkzeuge wie GIS oder statistische Auswerter zur Verfügung. Bei einem *Supermodel* sind die Daten-Modell und die Modell-Daten-Kopplung kaum sichtbar, da diese jeweils in einem einheitlichen Datenformat stattfinden. Damit gibt es immer genau eine Kopplung der Kategorie Daten-Modell- und Modell-Daten-Kopplung. Deutlicher werden beide Kategorien bei dem Konzept des *Interfaced Model*, da sowohl die Modell-Daten- wie auch die Daten-Modell-Kopplung hier nicht unbedingt einheitlich sind. Unterschiedliche Modellkomponenten produzieren in der Regel verschieden formatierte Ergebnisdaten. Auch sind die Eingangsdaten und Randbedingungen bei unterschiedlichen Modellkomponenten verschieden. Beispielsweise müssen die Niederschlagsdaten, die von einem Regenschreiber in einem Format (z. B. im DWD-Format) zur Verfügung gestellt werden, der Modelldomäne Kanalnetzmodell und Gewässermodell als Randbedingungen übergeben werden. Hier sind zwei Daten-Modell-Kopplungen notwendig, also zwei Konvertierungen vom DWD-Format in die jeweiligen Formate der Eingangsdaten der Modelle.

---

### 3.1.4 Anwendungsfelder der integrierten Modellierung

---

Die Entstehungsgeschichte der iM wurde bereits am Anfang dieses Kapitels (Kapitel 3.1) vorgestellt. In diesem Unterkapitel werden die praktischen Anwendungsfelder der aktuellen iM vorgestellt.

Ein Anwendungsfeld ist die Beurteilung urbaner wasserwirtschaftlicher Systeme aus immissionsorientierter Sicht. Novotny und Witte (1997) zeigten, dass bei der Beurteilung von Mischwasserüberläufen aus Kanalnetzen die reine emissionsorientierte Beurteilung nicht ausreicht, sondern die Wirkung auf das empfangende Gewässer entscheidend ist. Die Anforderung, eine immissionsorientierten Betrachtung vorzunehmen, wurde auch in der EU-WRRL (EC, 2000) gefordert. Für Deutschland, deren Kanalnetze zu einem erheblichen Anteil Mischwasserkanalisationen sind, bedeutet dies eine große Aufgabe (siehe Abbildung 3.7 und Tabelle 3.3). Da die EU-WRRL einen Zeitplan vorgibt, bis wann diese umgesetzt werden soll, muss ein System zur Beurteilung aufgebaut werden. Die iM ist ein wichtiger Baustein einer solchen Beurteilung.

## Kanalnetzarten

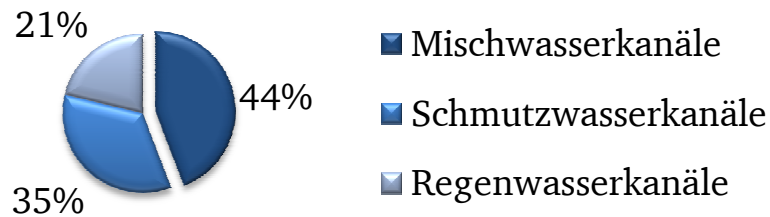


Abbildung 3.7 Kanalnetzarten in Deutschland im Jahr 2007 (nach Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.)

Wurden bisher Einleitungen aus Mischwasserüberläufen einzeln beurteilt, so sollen in Zukunft die gemeinsame Wirkung aller Einleitungen auf das Gewässer beurteilt werden. Daher sind mehrere urbane Gebiete zusammen mit dem empfangenden Gewässer sowohl in hydraulischer als auch in stofflicher Hinsicht integriert zu betrachten (Solvi, 2006). Durch die Komplexität dieses Systems bietet sich die iM als Lösung an (Butler und Schütze, 2005). Eine Herausforderung für ein praktisch handhabbares iM-System ist allerdings, ein ausgewogenes Verhältnis zwischen zu erfassender Datengrundlage und dem Detaillierungsgrad der abgebildeten Prozesse im iM-System herzustellen (HSGSim, 2008).

Ein weiteres Anwendungsfeld der iM ist die Optimierung von Kanalnetzen und Kläranlagen in Bezug auf die Wirkung auf das empfangende Gewässer (Rauch und Harremoës, 1999). Dabei wird auch die Frage aufgeworfen, mit welchen Belastungsregen optimiert werden sollte. So ist generell eine Langzeitregenreihe von > 10 Jahren zu bevorzugen (Ostrowski, 1991), was durch die Komplexität allerdings zu Performanzproblemen führen kann. Eine mögliche Umsetzung der iM mit Langzeitsimulationen wird in Peters (2007) beschrieben.

Tabelle 3.3 Anzahl der Regentlastungsanlagen in Deutschland 2007 (nach Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.)

	Regentlastungs- anlagen insgesamt	Überlaufbecken	Ohne Becken	Rückhaltebecken	Klärbecken
Werte	66.224	23.772	20.767	18.491	3.194

---

## 3.2 Generische IT-Infrastrukturen

---

Ziel dieser Arbeit ist der Entwurf und die Realisierung eines giM-Systems. Eine wesentliche Stütze der Ganzheitlichkeit ist dabei die Verwendung von Standards der Informationstechnologie speziell für Modellkopplung und Datenhaltung. Diese Standards sollten weitestgehend offen und damit generisch sein.

---

### 3.2.1 Generische Schnittstelle

---

Eine generische Schnittstelle kann mit einem Universal-Adapter verglichen werden, über den unterschiedliche Komponenten gekoppelt werden können. Ein bekanntes Beispiel eines Universal-Adapters ist der Universal Serial Bus oder kurz USB. Über die USB-Schnittstelle können unterschiedliche Peripheriegeräte (Drucker, USB-Speichermedium etc.) an einen Personal Computer angebunden werden (siehe Abbildung 3.8).

Bei der Modellierung sind generische Schnittstellen vor allem beim *Interfaced Model* interessant, da sie die Rolle des Vermittlers zwischen den Modellen einnehmen können. Es gibt unterschiedliche Umsetzungen einer generischen Schnittstelle. So gibt es standardisierte Frameworks wie Simulink von Matlab™ (Simulink, 1994), Beschreibungen von Software Interfaces wie OpenMI (Gregersen et al., 2007) oder deklarative Sprachen wie VHDL-AMS (Commerell, 1999). Im weitesten Sinn können auch Ontologien wie WaterML (Ames et al., 2009) oder HydroML (Piasecki und Bermudez, 2003) als generische Schnittstellen angesehen werden, wobei diese keinen Mechanismus besitzen, wie die Schnittstellen implementiert werden.

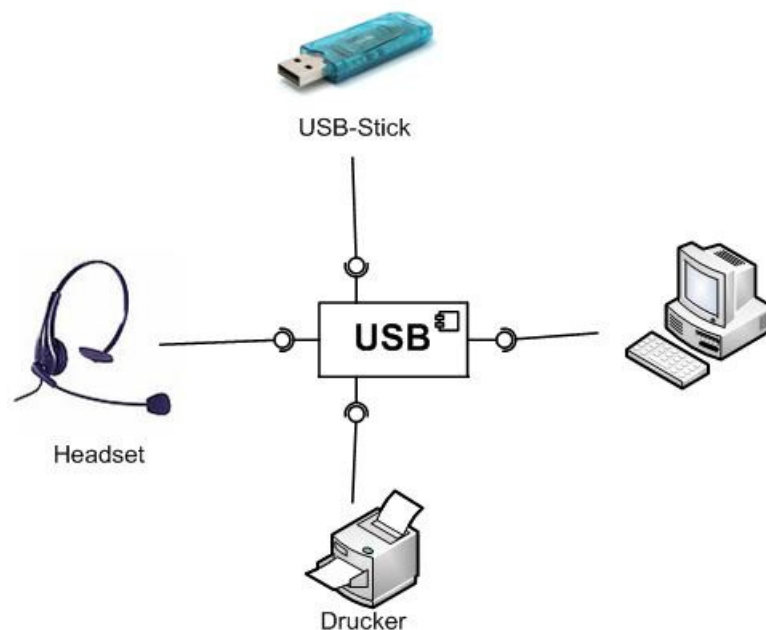


Abbildung 3.8 Beispiel des USB-Standards als generische Schnittstelle

---

### 3.2.2 Generische Schnittstellentechnologie in der wasserwirtschaftlichen Modellierung

---

Der Bedarf, wasserwirtschaftliche Software mit Schnittstellen zu erweitern, ist erst in dem letzten Jahrzehnt gestiegen. Grund dafür sind unter anderem die Anforderungen aus der iM. Die Schnittstellen wurden meist proprietär implementiert. Ein Beispiel ist die Produktfamilie Infoworks (MWH, 2010), bei der die Kommunikation der einzelnen Modellsysteme über eigene Firmenstandards realisiert wird. Ähnlich verhält es sich bei der Produktfamilie der ITWH (itwh, 2010).

Generische Schnittstellen haben sich bisher in der Wasserwirtschaft nicht durchgesetzt. Doch gerade beim Einsatz von Produkten unterschiedlicher Hersteller sind generische Schnittstellen hilfreich. Aus diesem Grund sind Forschungsprojekte initiiert worden, die eine generische Schnittstellentechnologie in der wasserwirtschaftlichen Modellierung zum Ziel haben (Jagers, 2010). Ein weiterer Grund für generische Schnittstellentechnologie ist die Wiederverwendbarkeit bereits entwickelter Modellsoftware (Holzworth et al., 2010).

Das Open Modelling Interface OpenMI (Gregersen et al., 2007) ist ein Projekt, das aus dem HarmonIT Projekt hervorgegangen ist (Blind und Gregersen, 2005; Moore et al., 2004). HarmonIT (Gijbers et al., 2002) befasste sich mit den theoretischen Grundlagen einer generischen Schnittstellentechnologie, OpenMI führt diese Grundlagen hin zu einer Realisierung dieser Schnittstellen und der Bereitstellung eines Frameworks.

Neben OpenMI gibt es weitere vielversprechende Projekte. So gibt es das *Project Invisible Modelling Environment* (kurz TIME), das ähnlich wie OpenMI das Ziel hat, ein Modellierungsframework bereitzustellen (Rahman et al., 2003, 2005). Ein weiteres Projekt vom *Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science* (CUAHSI) beschäftigt sich neben der Modellkopplung mit der Datenintegration von gemessenen Daten (Maidment, 2008).

Wiederum beschäftigen sich weitere Projekte nicht vorrangig mit den generischen Schnittstellen, sondern mit dem generischen Datenaustausch als solchem. Notay et al. (2010) beschreibt hierfür ein Tensor-Objekt, das neben den auszutauschenden Daten alle weiteren Informationen beinhaltet wie z. B. räumliche, strukturelle und funktionale Informationen.

Zusammenfassend sind Projekte durchaus vorhanden, die generische Schnittstellen für wasserwirtschaftliche Software zum Ziel haben. Allerdings sind diese auf einem unterschiedlichen Entwicklungsstand und deren Anwendungsziele unterschiedlich. Für diese Arbeit wurde OpenMI als generische Schnittstellentechnologie verwendet, da es zum einen weit entwickelt ist (Jagers, 2010), zum zweiten am Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung der TU Darmstadt (ihwb) bereits ein abgeschlossenes Forschungsvorhaben OpenMI zum Thema hatte (Brehmer et al., 2009) und zum dritten OpenMI als Open-Source-Projekt die Möglichkeit bietet, das Projekt um bisher nicht implementierte Lösungen zu erweitern.



---

## Open Modelling Interface – OpenMI

---

Die Entwicklung von OpenMI geht auf das Projekt HarmonIT zurück (Gijsbers et al., 2002). HarmonIT beschäftigte sich hauptsächlich mit den theoretischen Grundlagen der Modellkoppelung von hydrodynamischen Modellen, aber auch eine Anbindung anderer Modelltypen wurde berücksichtigt. Mit OpenMI Version 1.0 wurde der erste Prototyp einer generischen Schnittstellentechnologie samt Modellframework veröffentlicht. Die Erfahrungen, die mit dem Prototyp gesammelt wurden, sind in die Version 1.4 eingeflossen. Mit der Einführung in Version 1.4 sind erstmals Modellsysteme mit OpenMI-Fähigkeit veröffentlicht worden. Aktuell ist die Version 2.0, die zahlreiche Erweiterungen und Verbesserungen beinhaltet. Der Termin für die Veröffentlichung von OpenMI 2.0 lag allerdings im Dezember 2010, so dass im Rahmen dieser Arbeit die Version 2.0 nicht berücksichtigt werden konnte.

OpenMI sollte von Beginn an nicht auf eine einzelne Programmiersprache festgelegt sein. Es gab zwar die Einschränkung, dass OpenMI für Windows-PC Systeme entwickelt wurde, aber durch die Implementierung von OpenMI in .NET und JAVA läuft OpenMI auch auf Linux-PC Systemen. Allerdings ist zu bemerken, dass die Entwicklung hauptsächlich in .NET vorangetrieben wird, die erst anschließend daran in JAVA umgesetzt wird. Daraus ergibt sich, dass die JAVA-Version in der Entwicklung immer einen Schritt zurück liegt. Dies kann auch der Grund dafür sein, warum zurzeit keine abgeschlossenen OpenMI-Projekte veröffentlicht wurden, die für einen Linux-PC konzipiert sind.

Die Funktionsweise von OpenMI baut darauf auf, dass jede angebundene Komponente zum einen die Schnittstellen implementiert, die von OpenMI vorgegeben werden, und zum anderen die im Standard nicht spezifizierten Aufgaben übernimmt. Das heißt, die Intelligenz verbleibt in der Modellkomponente. So werden z. B. Konvertierungsaufgaben oder Interpolationen von den Modellsystemen übernommen. Einige Beispiele dafür sind in Kapitel 4.1.1 erläutert.

Verknüpft werden die OpenMI-Komponenten über das OpenMI-Framework. Die Simulation selbst wird auch innerhalb des Frameworks gestartet. Diese arbeitet mithilfe eines sogenannten Pull-Mechanismus, der nachfolgend beschrieben wird. Das Ziel des Pull-Mechanismus ist das Festlegen der Reihenfolge der Simulation eines Zeitschritts der jeweiligen Modellsysteme – also kurz die Reihenfolge der einzelnen Simulationen. Bei einem Pull-Mechanismus gibt es eine Initialisierungsanfrage, die an genau ein Modellsystem gestellt wird. Erfragt wird der späteste Wert der Simulation, also ein Wert zum Endzeitpunkt des gewünschten Simulationszeitraums. Als nächstes wird geprüft, ob von weiteren verknüpften Modellsystemen Werte benötigt werden. Wenn ja, dann werden von den verknüpften Modellen die fehlenden Werte erfragt. Wiederum wird geprüft, ob für die Simulation von weiteren Modellsystemen Werte benötigt werden. Sind alle verknüpften Modellsysteme identifiziert, stellen die Modellsysteme zunächst fest, ob vorherige Zeitschritte simuliert werden müssen, um den in der Initialisierungsfrage erfragten Wert zurückgeben zu können. Das heißt, es wird der Simulationsstartzeitpunkt festgelegt. Sind alle Fragen gestellt, so wird der erste Simulationszeitschritt berechnet und danach werden die Werte ausgetauscht. Dies wiederholt sich so lange, bis der am Anfang mit der Initialisierungsanfrage angeforderter Wert berechnet wurde. Dies ist gleichbe-

---

deutend mit dem Ende der Simulation. In Abbildung 3.9 ist der Mechanismus schematisch dargestellt.

Durch die Nutzung des Pull-Mechanismus ist eine Zeitschritt unabhängige Simulation möglich. Das heißt, die einzelnen angebundenen Modellsysteme dürfen unterschiedliche Berechnungszeitschritte haben. Bidirektionale Verknüpfungen werden durch einfache Iteration gelöst. Entsprechend intelligentere Lösungen können aber direkt in den Modellkomponenten implementiert werden.

Bei der Entwicklung von OpenMI wurde ein Hauptaugenmerk auf die räumlichen Definitionen der Verknüpfungen gelegt. So kann neben einer nicht räumlich definierten Verknüpfung (ID-basiert) eine Punktverknüpfung (Punkt[X,Y,Z]) oder eine Grid-Verknüpfung (Flächen oder Punkte) definiert werden. Eine Interpolation bei nicht übereinander liegenden Flächen und Punkten muss von dem exportierenden Modellsystem vorgenommen werden.

Dies soll anhand eines Beispiels mit einem Modellsystem demonstriert werden, welches Niederschlagsdaten von zwei Regenschreibern (als X-Y-Punkte) exportiert. Die Koordinaten der Regenschreiber sind (1,1) und (1,4). Wird das Modellsystem nun mit einem weiteren Modellsystem verknüpft, das die Niederschlagsdaten für den Punkt (1,2) erwartet, so muss das exportierende System mit den Niederschlagsdaten entscheiden, wie damit umgegangen wird. Eine Möglichkeit ist die Niederschlagsdaten für den Punkt (1,2) aus den vorhandenen Daten für Punkt (1,1) und Punkt (1,4) zu interpolieren. Eine weitere Möglichkeit ist die Daten des nächstgelegenen Datenpunkt (1,1) zu exportieren. OpenMI bietet zwar Bibliotheken, um diese Aufgaben zu übernehmen, welche Methode verwandt wird, muss das Modellsystem mit den Niederschlagsdaten aber selbst entscheiden.

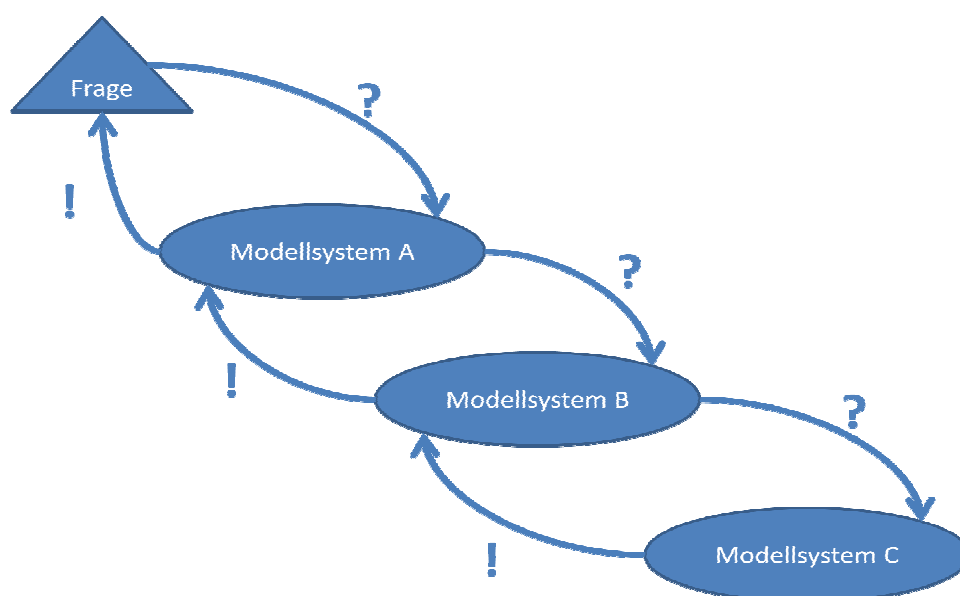


Abbildung 3.9 Pull-Mechanismus von OpenMI

---

### *Aufbau eines OpenMI fähigen integrierten Modellsystems im Rahmen eines Forschungsvorhabens am ihwb*

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens am Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung der TU Darmstadt wurde ein OpenMI basiertes integriertes Modellsystem prototypisch aufgebaut. Ziel dieses Systems ist die immissionsorientierte Beurteilung von Mischwasserüberläufen aus multiplen Siedlungsgebieten im Rahmen der Weiterentwicklung des bisherigen immissionsorientierten Nachweisverfahrens „Leitfaden zur Erkennung kritischer Gewässersituationen“ (HMULV, 2004). Im Vordergrund der Beurteilung stand, ein System zu schaffen, das mit möglichst geringer Datengrundlage zurechtkommt und die vom Land Hessen genutzte Schmutzfrachtmodell-Software SMUSI (Muschalla et al., 2007) in das System einbezieht (Brehmer et al., 2009).

Es wurde ein System aufgebaut, welches das Schmutzfrachtmodell SMUSI mit einem Gewässermodell BlueM.Sim (mit Gewässergütemodellierung) über OpenMI koppelt. Der Austausch der Daten erfolgt als Vektor mit Abfluss und Stoffkonzentrationen an jeder einzelnen Entlastungsstelle des Kanalnetzes. Das Schmutzfrachtmodell SMUSI konvertiert dabei seine Stoffkonzentrationen in die vom Gewässermodell erwarteten Stoffgruppen (Reußner et al., 2009). Der Datenaustausch erfolgt unidirektional und ist an den Verknüpfungspunkten nicht räumlich definiert (ID-basiert).

Neben den Modellsystemen wurde auch ein einfaches Auswertungswerkzeug entwickelt, welches über OpenMI an das Gewässermodell angebunden werden kann, um schon während der Simulation Ergebnisdaten auszuwerten zu können (Reußner et al., 2009).

Das System des Forschungsvorhabens ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Aufbauend auf diesem System ist in dieser Arbeit ein giM-System implementiert worden. Die roten Pfeile sind die Verknüpfungen von Modellsystem zu Modellsystem. Diese sind mit der OpenMI-Verknüpfungsmethode des oben beschriebenen Pull-Mechanismus gekoppelt. Die grünen Pfeile sind die Verknüpfungen von Modellsystem zu der Auswertungskomponente. Die Verknüpfungen an das Auswertungswerkzeug werden über OpenMI-Events gesteuert – wenn ein Modell den Zeitschritt zu Ende gerechnet hat, wird dieses Ereignis gesendet.

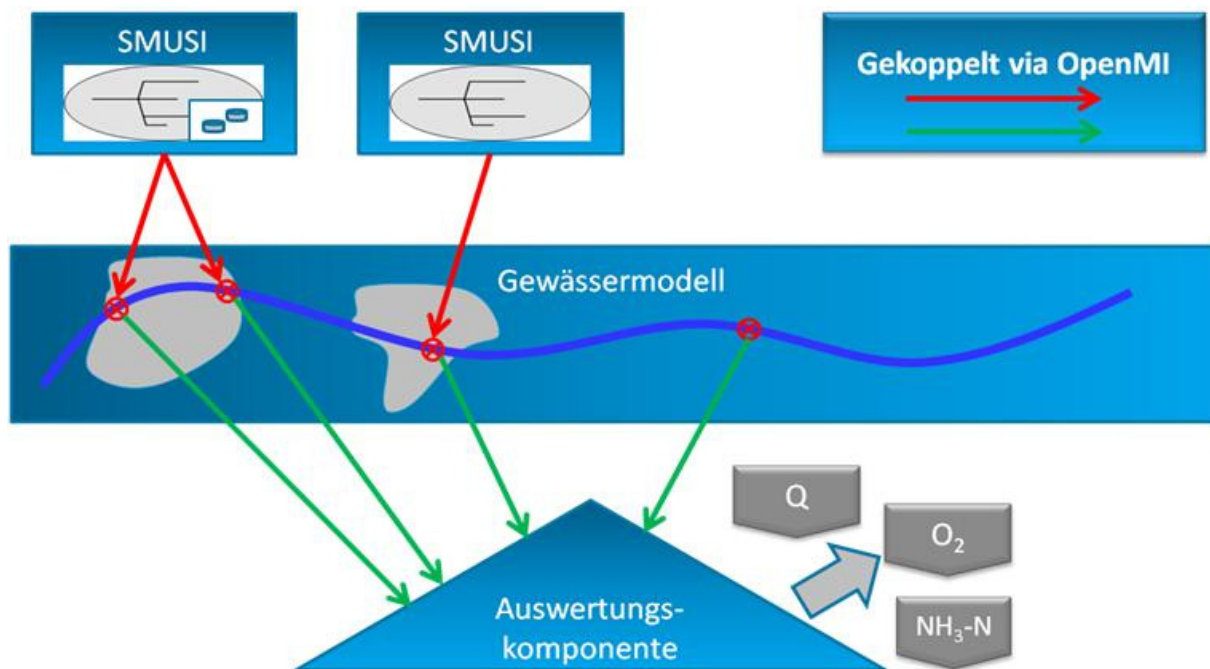


Abbildung 3.10 OpenMI basiertes integriertes Modellsystem des ihwb (nach (Reußner et al., 2009))

### Anbindung von Modellsystemen an OpenMI über wrapper

Um Modellsysteme an das OpenMI-Framework anbinden zu können, müssen diese die OpenMI Schnittstellen implementieren. Eine verbreitete Methode, diese in bereits bestehende Modellsysteme zu implementieren, ist die Nutzung des *software patterns* Adapter oder *wrapper* (Gamma et al., 1995). Die Modellsysteme werden dabei von einem *wrapper* umschlossen (siehe auch Kapitel 2.2.1), der dann die Kommunikation mit OpenMI und den bestehenden Modellsystemen realisiert (siehe Abbildung 3.11). Programmtechnisch ist der *wrapper* bei Windows-PC-Systemen als *Dynamic Link Library* (DLL) kompiliert, die über die .Net Schnittstellen (als *Assembly*) aufgerufen werden kann. Das umschlossene Modellsystem ist auch als DLL kompiliert, allerdings ist diese DLL eine native DLL, d. h. es bietet direkt die Einsprungadressen (*Platform Invocation Services*) an, mit denen die exportierten Methoden aufgerufen werden können.

In der Regel muss die Softwarearchitektur der Modellsysteme dafür verändert werden (Rizzoli et al., 2005; Moore et al., 2004). Z. B. sind unterschiedliche Zeitschleifen innerhalb eines Modellsystems, die aus Performanzgründen implementiert wurden, nicht mehr zulässig. Ein Beispiel für verkürzte Zeitschleifen ist ein Kanalmodellsystem, welches überprüft, ob Regen in den nächsten 24 Stunden fällt. Wenn kein Niederschlag fällt, wird ein integrierter Simulationszeitschritt von 24 Stunden statt fünf Minuten ausgeführt (wie in der Simulationssoftware SMUSI (Muschalla et al., 2007)).

Im Rahmen des oben beschriebenen Forschungsvorhabens wurden die Modellsysteme SMUSI und BlueM.Sim OpenMI fähig gemacht, was im Folgenden als Beispiel demonstriert wird, wie eine OpenMI Fähigkeit von Modellsystemen hergestellt werden kann.

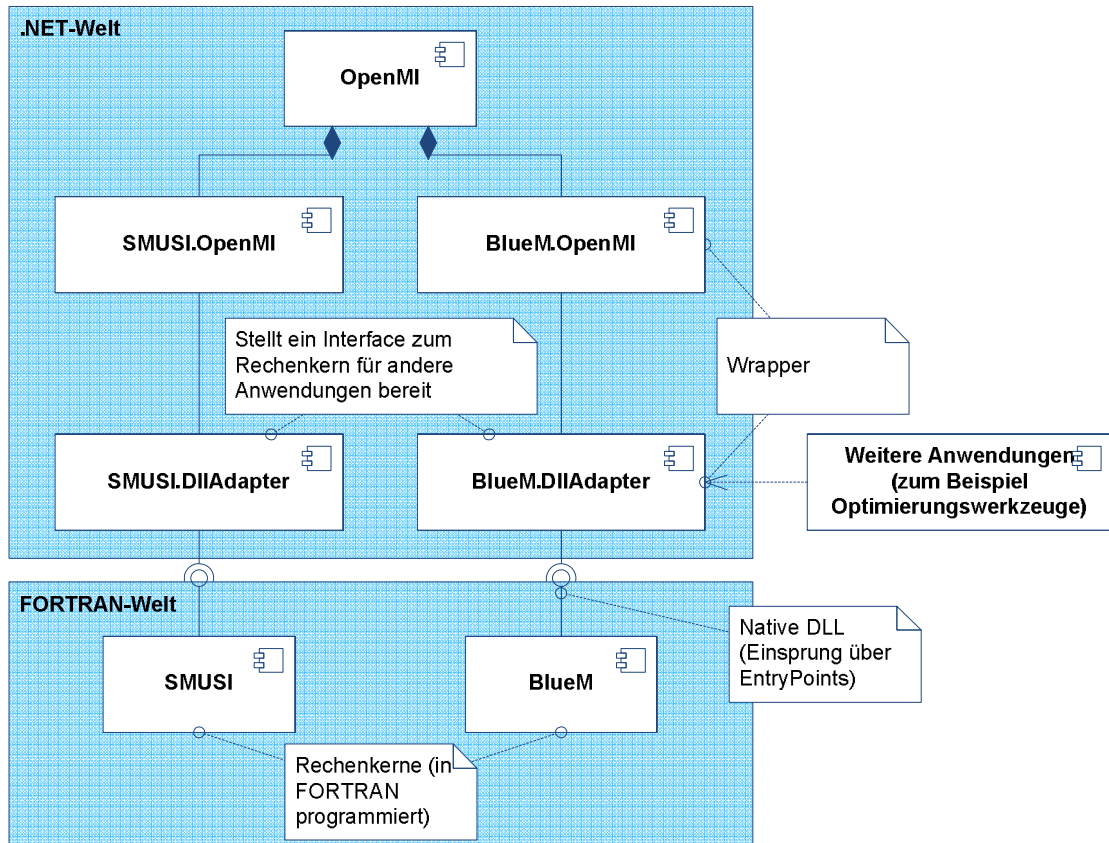
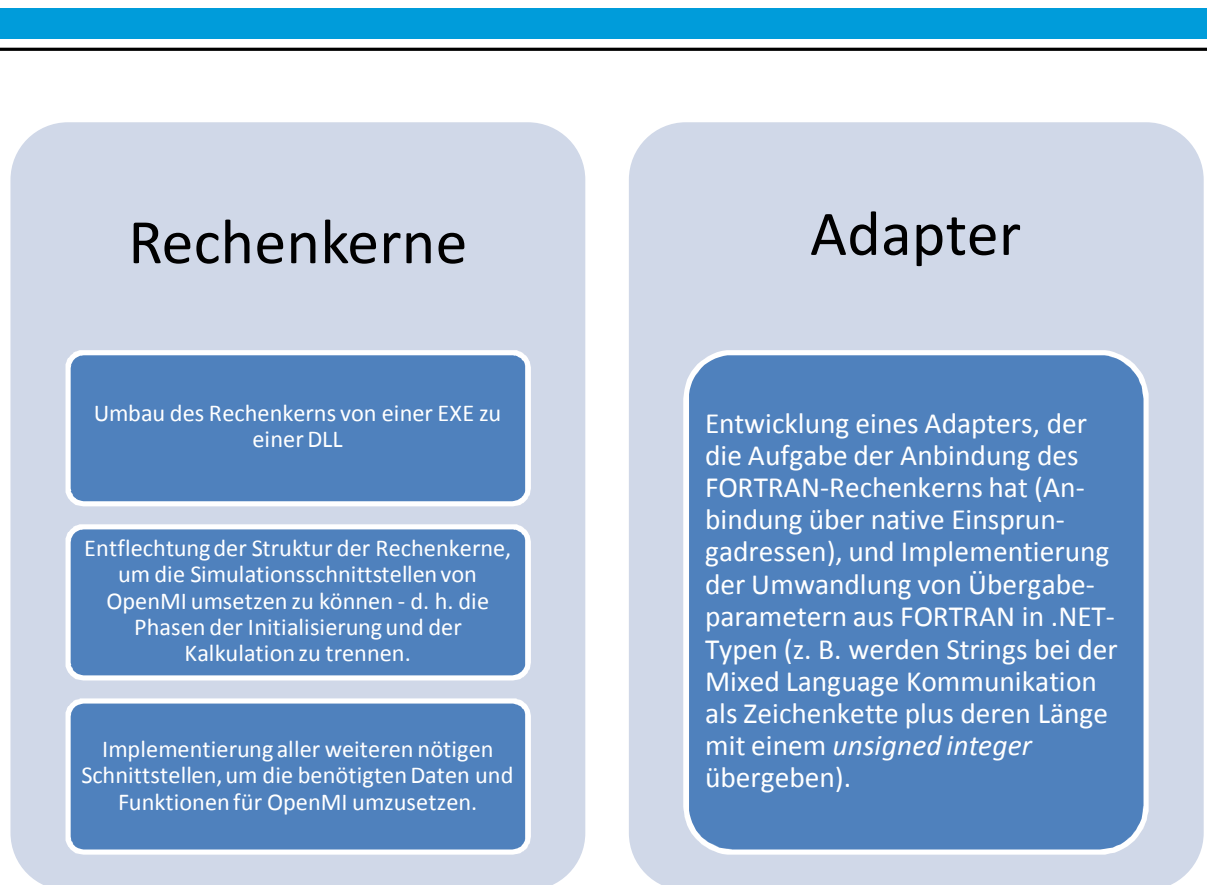


Abbildung 3.11 OpenMI Adapter für Rechenkerne (nach (Reußner und Heusch, 2008))

Eine Herausforderung, Modellsysteme um die OpenMI Schnittstellen zu erweitern, besteht bei der Anbindung der Modellsysteme an den *wrapper*. Die Simulationskerne des Modellsystems sind in der Regel nicht in den modernen Programmiersprachen .Net oder JAVA erstellt worden, so dass eine sprachübergreifende Anbindung realisiert werden muss. In dem oben beschriebenen Forschungsvorhaben sind dazu die in FORTRAN entwickelten Simulationskerne von SMUSI und BlueM.Sim mit den folgenden Schritten erweitert worden, die in Abbildung 3.12 dargestellt sind.



**Abbildung 3.12 Aufgaben bei der Implementierung der OpenMI-Fähigkeit von Modellsystemen**

Ein verbreitetes Problem bei der Umstellung von EXE auf DLL sind globale Variablen und die in sich nicht direkt auflösbare prozedurale Struktur des Quellcodes. Aus diesem Grund können in einer Simulationssoftware nicht mehrere Modelle gleichzeitig simuliert werden. Um dieses Problem zu lösen, haben Reußner et al. (2009) ein Prinzip aufgezeigt, wie eine DLL in Form von Instanzen behandelt werden kann. Durch diese Anbindung muss der Quellcode des Modellsystems nicht weiter angepasst werden (siehe Abbildung 3.13).

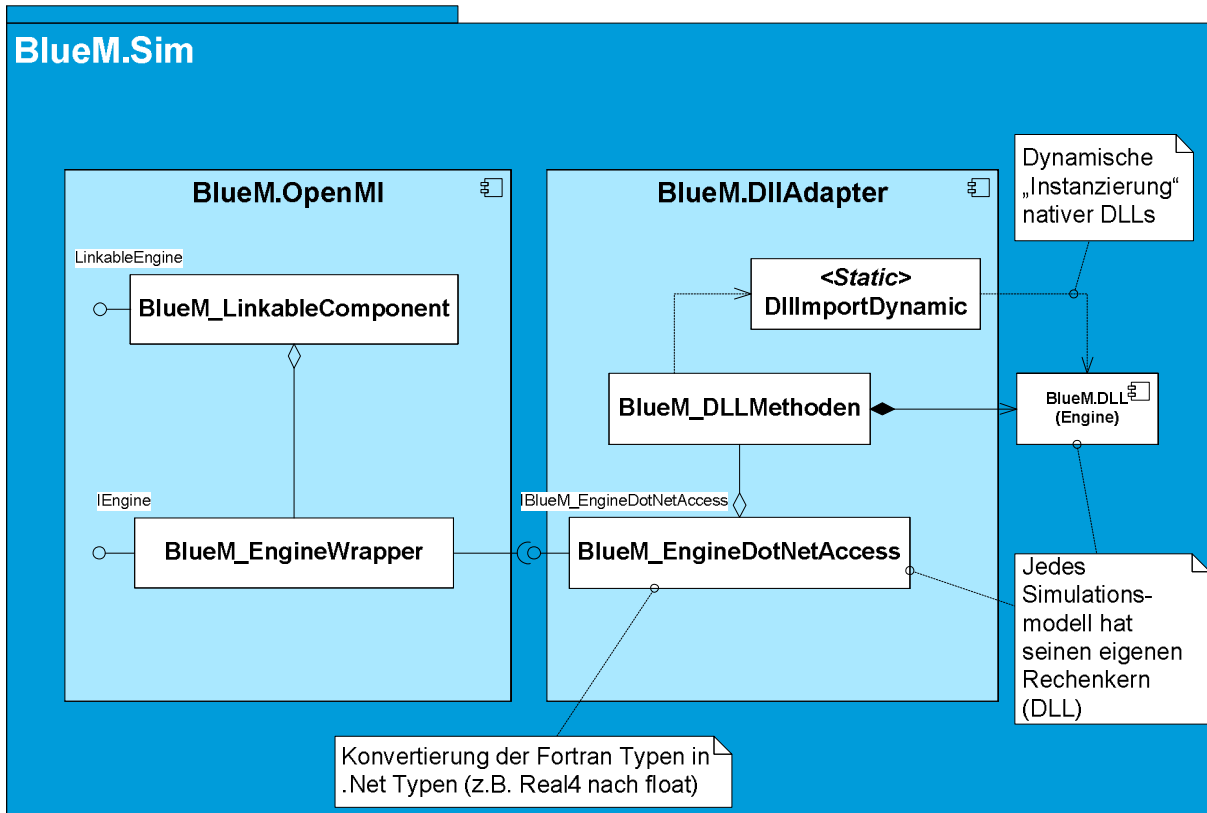


Abbildung 3.13 Aufbau der Adapter am Beispiel von BlueM.Sim (Reußner et al., 2009)

### 3.2.3 Standards der Datenhaltung und Datenkopplung

Während die auf wasserwirtschaftliche Themenfelder spezialisierte Modellwelt stark von diesen geprägt ist und deshalb generische Schnittstellentechnologien auf diese Besonderheit eingehen müssen, sind die Anforderungen an Standards für Daten (deren Haltung und deren Kopplung) nicht wesentlich durch die Spezialisierung beeinflusst. Die Herausforderungen der Standards für Daten liegen im Bereich der Heterogenität und der Masse der Daten. In den nächsten 10 Jahren werden voraussichtlich mehr wissenschaftliche Daten produziert als bisher in der gesamten menschlichen Geschichte (Horsburgh et al., 2009). Eine strukturierte Datenhaltung ist deshalb unbedingt erforderlich. Dabei darf die Struktur der Datenhaltung nicht zu statisch sein, um auf die Heterogenität der Daten eingehen zu können (Colomb, 1997).

Abbildung 3.14 zeigt eine Auswahl an Datenhaltungsstandards. Die vorgestellten Datenbanksysteme sind die gebräuchlichsten Datenbankmanagementsysteme, die aktuell genutzt werden. Die relationalen Datenbanksysteme speichern ihre Daten mit tabellarischen Verknüpfungen in binärer Form. Objekt-Datenbanken verfolgen den Ansatz der objektorientierten Architektur (OOA) und speichern komplette Speicherabbilder von Objekten in ihrem Datenbanksystem. Die Objektrelationalen Datenbanken gehen einen Mittelweg, so dass nach außen, d. h. aus Nutzersicht, die Datenbank Objekte enthält, diese aber durch Data-Mapping intern wie eine relationale Datenbank behandelt werden. Als letzten Vertreter der Auswahl an Datenbanksystemen ist die XML-Datenbank vorgestellt. Die Benutzung der XML-Datenbank erfolgt

mittels der Query-Sprache *XPath*, so dass von außen die XML-Datenbank wie eine einzige XML-Datei erscheint.

In der Auswahl sind als Vertreter der textbasierten Dateien die Standards XML, *WaterML* und *HydroML* vorgestellt. XML ist ein universelles Format, das vor allem in der Kommunikation über Netzwerke bzw. dem Internet eingesetzt wird. Es hat den Vorteil, dass es sowohl ein mensch- als auch maschinenlesbares Format ist. *WaterML* und *HydroML* basieren beide auf XML, allerdings sind hier strenge Vorgaben gemacht, wo und wie welche Daten abgelegt werden. Diese Vorgaben entspringen aus der zugrunde liegenden Ontologie der jeweiligen Standards.

Als letzter Vertreter ist das Format netCDF aufgeführt, das ein binäres Datenformat ist. Neben den Daten werden bei netCDF gleichermaßen die Metadaten gespeichert.

Für ein Simulationssystem sind geringe Simulationszeiten ein Hauptanliegen. Aus diesem Grund werden die datenbankbasierten Standards nicht weiter betrachtet, da sie im Vergleich zu binären Datenformaten wesentlich längere Auslesezeiten bedeuten und deshalb zu längeren Simulationszeiten führen. Auch die auf XML basierenden Datenformate genügen den Anforderungen an die Performanz nicht, so dass in dieser Arbeit das Format netCDF seine Anwendung finden.

In dieser Arbeit wird ein weiterer Standard zu dem Entwurf eines giM hinzugefügt: der *Standard Sensor Observation Service* (SOS). SOS ist Teil der vom *Open Geospatial Consortium* (OGC) erstellen OpenGIS® Standards (Botts et al., 2008). Die Verwendung von SOS demonstriert in dieser Arbeit einen Zugriff auf die Daten, also keinen Datenhaltungsstandard, sondern einen Vertreter von Datenkopplungsstandards.

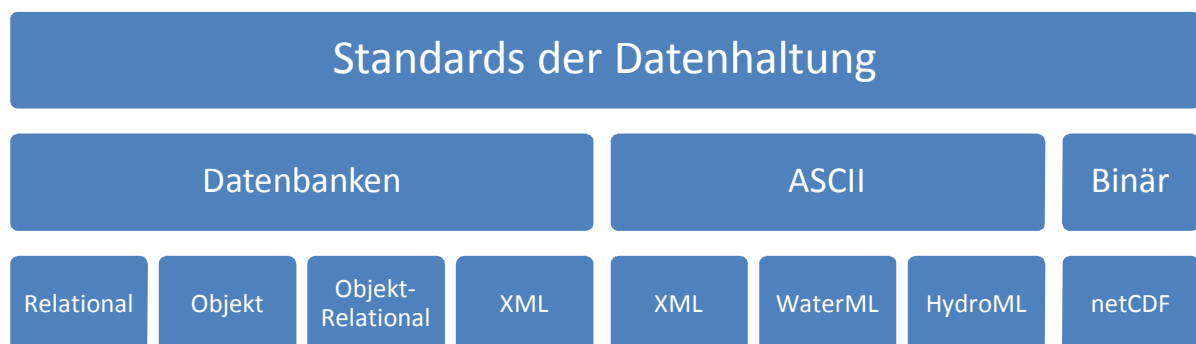


Abbildung 3.14 Beispiele für Standards der Datenhaltung



---

## netCDF – Standard zur Haltung von Daten

---

netCDF (*network Common Data Form*) steht zum einen für ein wissenschaftliches Datenformat, zum anderen steht es für die zugehörigen Bibliotheken und Werkzeuge (Rew und Davis, 1990). netCDF geht auf einen Standard der NASA mit dem Namen *Common Data Format* (CDF) zurück (Treinish und Gough, 1987).

Die zugehörigen Bibliotheken und Werkzeuge stehen für verschiedene Plattformen und Programmiersprachen zur Verfügung und werden von *Unidata*, einem *Community Program der University Corporation for Atmospheric Research* (UCAR), im Rahmen eines Open-Source-Projektes betreut. Die hauptsächliche Verwendung von netCDF findet im Bereich der Geowissenschaften und der Klimaforschung statt, wo netCDF zu den am weitesten verbreiteten wissenschaftlichen Datenformaten zählt (Zender, 2008).

Ein wesentliches Merkmal von netCDF ist, dass neben den Daten auch Metadaten gespeichert werden. So besteht eine netCDF-Datei aus einem Header mit Metadaten und dem eigentlichen Datenblock, in dem mehrdimensionale Arrays maschinen- und plattformunabhängig in binärer Form gespeichert werden. In den Metadaten werden Informationen über Herkunft, Kommentare, Einheiten, Qualitätsbetrachtungen, statistische und geografische Aussagen in Zusammenhang mit den Daten standardisiert in einer Datei gespeichert (Rew und Davis, 1990).

Wie wichtig die Speicherung der Metadaten zusammen mit den Daten ist, zeigte sich beispielsweise, als der 125 Millionen Dollar wertvolle Mars Climate Orbiter fast bei einem Navigationsmanöver verloren ging, weil bei den empfangenen Flugbahndaten davon ausgegangen wurde, dass diese metrisch seien und nicht wie tatsächlich im angloamerikanischen Maßsystem (Stephenson, 1999).

Durch den schnellen Lese- und Schreibzugriff auf die Daten hat netCDF als wissenschaftliches Datenformat Vorteile gegenüber relationalen Datenbanksystemen (Cohen et al., 2006). Eine detaillierte Einführung in Aufbau und Funktionsweise von netCDF findet man unter anderem in Rew und G. Davis (1990) und Rew et al. (1997).

Der Standard netCDF gibt selbst nicht vor, in welcher Konvention die Metadaten formatiert werden sollen. Da ursprünglich netCDF für die Speicherung von Wetter-, Klimasimulations- und Satellitendaten entworfen wurde (Rew und Davis, 1990), steht aus diesem Bereich mit den netCDF *Climate and Forecast (CF) Metadata Conventions* (Lawrence Livermore National Laboratory, 2010) eine große Anzahl an Konventionen zur Verfügung, die bei Einhaltung dieser Standards einen Metadatenaustausch ermöglicht.

Die weite Verbreitung von netCDF hat auch eine Vielzahl von zusätzlichen Implementierungen und Werkzeugen hervorgebracht, die eine weitere Verarbeitung und Analyse zum Ziel haben. Hierzu gehören z. B. Werkzeuge wie die „netCDF Operators“ (Zender, 2008) und grafische Oberflächen wie „ncBrowse“ (Denbo, 2001).

Unidata selbst stellt mit *Thematic Realtime Environmental Distributed Data Services* (THREDDS) eine Möglichkeit für den Zugriff auf netCDF über Remote Data Access Protokolle wie OpenDAP, HTTP, OGC Web Coverage und OGC Web Map Service zur Verfügung (Domenico et al., 2006).

---

Ein weiterer Effekt ist die standardmäßige Unterstützung durch kommerzielle Software wie Matlab™ und ArcGIS™, der auf die weite Verbreitung von netCDF zurückzuführen ist. netCDF stellt damit einen aussichtsreichen Kandidaten für ein Standardaustausch- und Archivierungsformat wissenschaftlicher Daten dar (Jagers, 2010).

Das Datenmodell von netCDF kennt vier verschiedene Objekte (siehe Abbildung 3.15). Das Objekt *File* existiert nur einmal und beschreibt den Zugriff auf die physisch vorhandene Datei. Ein *File* hat ein oder mehrere *Dimensionen*. Die *Dimensionen* sind die Entitäten, von welchen die Werte abhängen. Die Objekte *Variable* repräsentieren die Werte. Mit den Objekten *Attribute* werden zusätzliche Informationen angehängt (an den *File*, die *Dimensionen* oder die *Variablen*).

Um das zu verdeutlichen, wird dies an einem einfachen Beispiel einer Zeitreihe mit Pegelmessungen demonstriert. Als *Variable* wird die Pegelmessung verwendet. Die Messung hat unterschiedliche Zeitpunkte, also ist eine *Dimension* die Zeit. Ein *Attribute* könnte die Einheit der Messung sein (z. B. „m³/s“), die der *Variable* zugeordnet wird.

Ein weiteres Beispiel ist ein Netz von mehreren Regenschreibern mit zugehörigen Daten. Alle Messstellen besitzen die Raumkoordinaten X und Y. Die räumlichen Koordinaten sollen als *Dimensionen* mit aufgenommen werden. In Abbildung 3.16 wird die Datenhaltung in netCDF visualisiert. Die Achsen beschreiben hier die *Dimensionen*, und die Flächen sind die *Variablen*, welche die zugehörigen Werte der Regenschreiber enthalten.

netCDF ist ein binäres Datenformat. Von den Entwicklern von netCDF ist deshalb die Syntax „Network Common Data Form Language“ (CDL) entwickelt worden, wie diese Binärdaten illustriert werden können (siehe Abbildung 3.17). In dem Paket von netCDF sind Werkzeuge enthalten, mithilfe deren aus netCDF-Dateien CDL-Dateien gebildet werden (ncdump.exe) und aus CDL-Dateien netCDF-Dateien generiert werden (ncgen). CDL wird in dieser Arbeit verwendet, um den Inhalt von netCDF-Dateien als Text darzustellen. Ein Beispiel einer CDL Datei zeigt Abbildung 3.18.

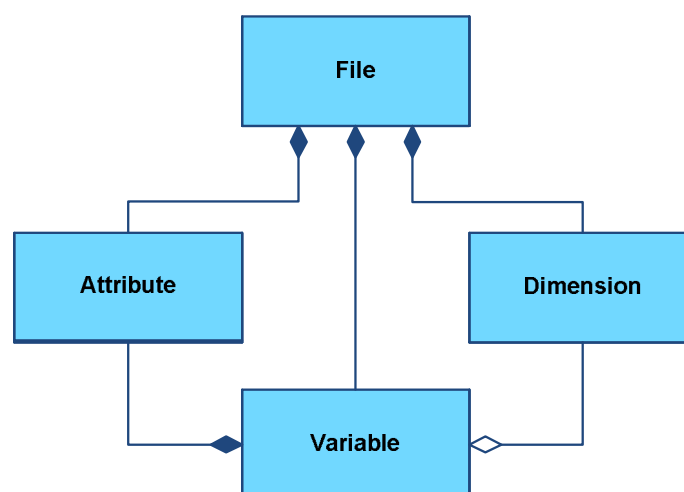


Abbildung 3.15 Datenmodell von netCDF

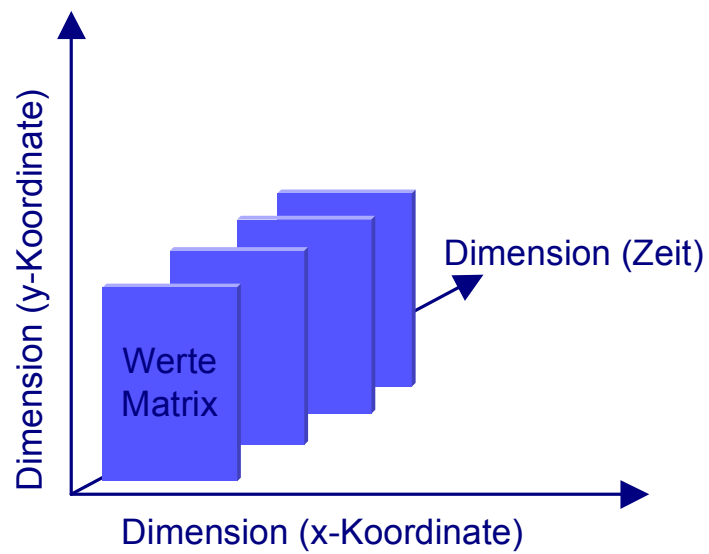


Abbildung 3.16 Speicherung der Daten in netCDF

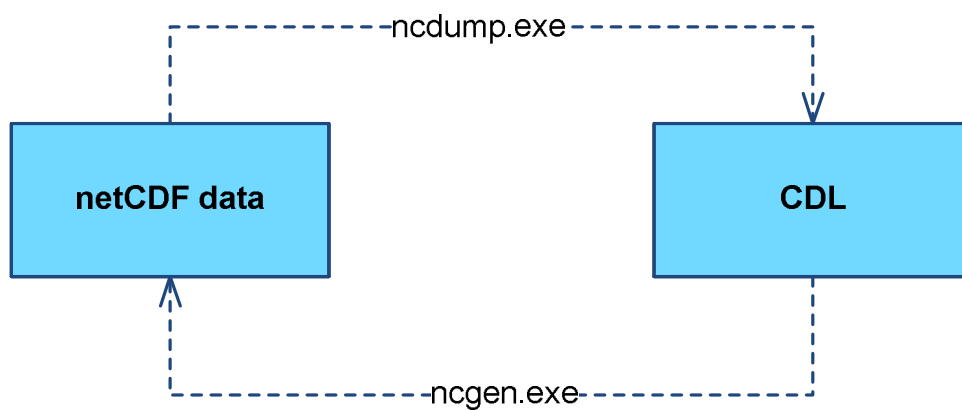


Abbildung 3.17 Network Common Data Form Language (CDL) und netCDF

```

netcdf S49_windstill {
dimensions:
    time = UNLIMITED ; // (15732 currently)
    location = 1 ;
    location_x = 1 ;
    location_y = 1 ;
variables:
    double time(time) ;
        time:long_name = "time" ;
        time:units = "days since 11-17-1858 0" ;
        time:calendar = "ModifiedJulianDay" ;
    double location_x(location_x) ;
        location_x:long_name = "y-Koordinate" ;
        location_x:short_name = "y-Coor" ;
        location_x:units = "m" ;
    double location_y(location_y) ;
        location_y:long_name = "y-Koordinate" ;
        location_y:short_name = "y-Coor" ;
        location_y:units = "m" ;
    double Zufluss(time, location_x, location_y) ;
        Zufluss:long_name = "Result Value" ;
        Zufluss:short_name = "Value" ;
        Zufluss:units = "" ;
data:

    time = 49443.3368055556, 49443.3402777778, 49443.34375, 49443.3472222222,
        49443.3506944444, 49443.3541666667, 49443.3576388889, 49443.3611111111,
        49443.3645833333, 49443.3680555556, 49443.3715277778, 49443.375,

    (...)

    location_x = 3481830 ;

    location_y = 5515747 ;

    Zufluss =
        0.0141543187201023,
        0.0451170355081558,
        0.0845343768596649,
        0.114991739392281,
        0.128530234098434,
        0.140349522233009,
        0.154026329517365,
        0.169237434864044,
        0.184868365526199,
    (...)

```

**Abbildung 3.18** Beispiel einer Darstellung einer netCDF-Datei mittels CDL

---

## Sensor Observation Service (SOS) der OGC

---

Sensor Observations Service (SOS) ist ein von dem Open Geospatial Consortium (OGC) adaptierter Standard. SOS ist ein Standard für ein *web service interface* zum Erfragen, Filtern und Empfangen von gemessenen Daten bzw. den zugehörigen Messnetzinformationen. Die Kopplung zwischen Messnetz und erfragendem Client ist dabei unmittelbar bzw. nahe an Echtzeitdaten (Botts et al., 2008).

SOS wurde von der OGC im Rahmen von Sensor Web Enablement (SWE) entwickelt, das zum Ziel hat, ein Framework mit offenen Standards für über das Netzwerk angebundene Sensoren und Sensorsysteme aller Typen (von Regenschreibern bis hin zur Webcam) zu schaffen (Botts et al., 2008). Die einzelnen Teile des SWE sind in Abbildung 3.19 dargestellt.

Momentan ist SOS ein wesentlicher Bestandteil von zahlreichen Forschungsprojekten im Bereich der Hydrologie bzw. der Siedlungswasserwirtschaft (Beran et al., 2009; Devesa et al., 2009; Jagers, 2010; Piasecki et al., 2010; Verweij et al., 2010). Aus diesem Grund wird SOS für den Entwurf eines giM in dieser Arbeit berücksichtigt, obwohl es nicht in dem implementierten giM-System umgesetzt ist.

Hauptsächlich werden bei SOS die Daten über *web services* angebunden. So wird z. B. bei dem Projekt TIME (Rahman et al., 2005) die Nutzung der OGC-Standards dafür genutzt, das gesamte Modell mithilfe von *web services* über Inter- oder Intranet an Daten anbinden zu können (Fitch und Bai, 2009). Die Anbindung einer Datenbank mit wasserspezifischen Informationen (das National Water Information System der USA) über *web services* wird von Goodall et al. (2008) demonstriert, wobei bei diesem Projekt die OGC Schnittstellen nicht genutzt werden.

Ein sehr ähnliches Projekt zu dem giM-System dieser Arbeit ist das Projekt Hyd<sup>3</sup>Flow, das ein N-A Modell und Fließgewässermodelle (2D, 1D) miteinander koppelt. Für die Datenintegration ist die Datenkopplungsschnittstelle SOS implementiert (Maßmann et al., 2010). Der Unterschied zu dem in dieser Arbeit vorgestellten giM-System liegt in der Modellkopplung, die bei Hyd<sup>3</sup>Flow nicht als generisch angesehen werden kann, da proprietäre Schnittstellen genutzt werden.



Abbildung 3.19 Teile des OpenGIS® Standards, die bei Sensor Web Enablement des OGC verwendet werden (nach (Botts et al., 2008))

---

## 4 Analyse und Methodik der Erweiterung der integrierten Modellierung

---

*„Wahrheit ist gleich ein derart schwieriges Problem,  
daß die meisten in ihr keines sehen.“  
(Friedrich Dürrenmatt)*

Die integrierte Modellierung hat sich in der Vergangenheit hauptsächlich mit der Modellierung als solche beschäftigt. Dabei wurden Besonderheiten in Bezug auf Datenintegration und der Interdisziplinarität der Thematik kaum berücksichtigt. Mit dieser Arbeit wird ein System entwickelt, dass mit Hilfe von IT-Technologien diese Besonderheiten aufgreift, und damit den Gesamtprozess der Modellierung unterstützt – ein ganzheitliches integriertes Modellsystem.

Der Weg zu diesem Ziel geht über die Analyse der bisherigen integrierten Modellsysteme, der Modellkopplung und den in der IT-Technologie existierenden Standards hin zu einem Entwurf, der auf den existierenden Standards aufbaut und diese günstig kombiniert. Auf diesem Weg müssen Detailfragen berücksichtigt und geklärt werden, die alle für sich genommen einfache Fragmente darstellen, deren Beantwortung sich aber zu einem Mosaikbild zusammenfügen, das zeigt, wie ein giM-System aufgebaut werden kann.

In Kapitel 3 wurden die Grundlagen erläutert, die für den Aufbau einer giM und der Implementierung eines giM-Systems wichtig sind. Dieses Kapitel baut auf diesen Grundlagen auf, analysiert die Ausgangslage, konkretisiert die Fragestellungen und schließt mit einer Methodik zum Aufbau einer giM.

Als erstes werden die Detailprobleme bei gekoppelten Simulationen analysiert (Kapitel 4.1). Eine wichtige Eigenschaft eines ganzheitlichen Systems ist die Möglichkeit, Komponenten auszutauschen oder eine Verfeinerung an bestimmten Stellen des Systems vorzunehmen. Dies ist Thema des Kapitels 4.2. Die in der Einleitung (Kapitel 1.1) angeführte Inter- bzw. Transdisziplinarität wird in Kapitel 4.3 beleuchtet. Kapitel 4.4 stellt die zunehmende Wichtigkeit von georeferenzierten Daten und Modellen in den Fokus. Die für eine Implementierung eines giM-Systems verwendeten Modelle und sonstigen Komponenten werden in Kapitel 4.5 vorgestellt.

Die Berücksichtigung aller Grundlagen und analysierten Punkte führt dann in Kapitel 4.6 zu einer Methodik, die in einem Entwurf für ein giM endet (Kapitel 5).

---

### 4.1 Detailfragen und Detailprobleme der gekoppelten Simulation

---

Bei der Simulation gekoppelter iM-Systeme sind die Modellsysteme der unterschiedlichen Modelldomänen meist im Detaillierungsgrad verschieden. Gerade beim Datenaustausch müssen deshalb Detailfragen zu den ausgetauschten Daten und Informationen untersucht werden, um dann gegebenenfalls die Detaillierungsgrade anzupassen.

---

Neben dem Datenaustausch ist in der Modellierung bzw. der Simulation die Performanz von Simulationssystemen von entscheidender Bedeutung für die Anwendbarkeit. So sind hydrodynamische Modelle in der Regel besser geeignet, die Realität abzubilden, haben aber einen erhöhten Rechenaufwand. Ist aber für die Aufgabenstellung notwendig, einen langen Zeitraum in der Simulation zu betrachten, dann gewinnen hydrologische Modelle trotz ihrer ungenaueren Abbildung der Realität in der Anwendung an Bedeutung, da die hydrologischen Modelle nur einen Bruchteil der Simulationszeiten im Vergleich zu hydrodynamischen Modellen benötigen.

---

#### **4.1.1 Datenaustausch**

---

Der Datenaustausch kann nach zwei Arten anhand der Richtung des Datenaustauschs unterschieden werden. Den unidirektionalen Datenaustausch, bei dem ein Modellsystem Daten an ein weiteres übergibt, ohne von diesem weitere Daten zu benötigen. Die zweite Austauschart ist der bidirektionale Datenaustausch, bei dem ein Modellsystem Daten von dem jeweilig anderen benötigen, an das es Daten liefern soll. Ein Beispiel für den unidirektionalen Datenaustausch ist der Niederschlag aus einem Wettermodell in ein Kanalnetzmodell, bei dem ein unidirektionaler Datenaustausch stattfindet. Ein Vertreter des bidirektionalen Datenaustauschs ist die Kopplung von zwei hydrodynamischen Gewässermodellen, die den Abfluss und den Wasserstand austauschen. Da der Wasserstand von dem Abfluss abhängt und umgekehrt der Abfluss den Wasserstand festlegt, muss an der Kopplungsstelle ein bidirektionaler Datenaustausch stattfinden.

Bidirektionaler Datenaustausch impliziert eine parallele Modellkopplung, da eine sequentielle Modellkopplung die nötigen Iterationen eines einzelnen Simulationszeitschritts nicht abbilden kann. Das gleiche gilt, wenn ein Ringschluss des Datenaustauschs durch mehrere Modellsysteme entsteht. Ein solcher Ringschluss ist beispielsweise die Kopplung von Kanalnetz zu Gewässer, Gewässer zu Grundwasser und Grundwasser zu Kanalnetz. Auch dann kann das gesamte Modellsystem nur parallel gekoppelt werden, um diesen Umstand adäquat abbilden zu können.

Auch Peters (2007) kommt bei der Diskussion seines iM-Systems, welches auf sequentieller Kopplung beruht, zu dem Schluss, dass die Datenauf- und -nachbereitung bei der sequentiellen Kopplung sehr aufwendig ist und empfiehlt ein einheitliches Austauschformat. Wenn allerdings ein einheitliches Austauschformat entwickelt ist, dann ist der Mehraufwand gering, eine sequentielle Kopplung in eine parallele zu überführen.

Neben der Richtung des Datenaustauschs ist auch der Zeitpunkt des Datenaustauschs zu beachten. Idealerweise tauschen Simulationssysteme zum gleichen Zeitpunkt die Daten aus. Zwischen den Zeitpunkten des Austauschs liegt dann jeweils ein Simulationszeitschritt. Allerdings können die Modellsysteme einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad besitzen, der auch in Bezug auf die Simulationszeitschritte auftreten kann. Daraus folgen mitunter unterschiedliche Zeitspannen der Simulationszeitschritte der einzelnen Teilmodelle. Dies wiederum führt dazu, dass der Datenaustausch nicht mehr zum gleichen Zeitpunkt stattfinden kann.



---

Eine einfache Möglichkeit, diese zeitlichen Skalenprobleme zu lösen, ist das Angleichen des Zeitschritts, so dass der Datenaustausch an einem gleichen Zeitpunkt stattfinden kann. Dafür wählt das Simulationssystem mit der größeren zeitlichen Skala einen Simulationszeitschritt, der ein Vielfaches des Zeitschritts ist, der bei dem Simulationssystem mit der kleineren zeitlichen Skala gewählt ist. Damit liegt der Datenaustausch wieder auf einem Zeitpunkt, den beide Modelle zur Diskretisierung nutzen. Eine Grundproblematik bleibt dabei aber erhalten, da zwischen den Zeitpunkten des Datenaustauschs unterschiedlich viele Simulationszeitschritte der einzelnen Modelle liegen können. Darauf muss je nach der Quantität, die ausgetauscht wird, reagiert werden. So sind zeitlich unabhängige Quantitäten geeigneter – beispielsweise der Abfluss ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) oder Stoffkonzentrationen ( $\text{mg}/\text{l}$ ) –, jedoch müssen zeitlich abhängige Werte – beispielsweise Volumen ( $\text{m}^3$ ) oder Schmutzfrachten ( $\text{kg}$ ) – beim Austausch entsprechend verarbeitet werden – z. B. durch Aussummierung während der Simulationszeitschritte, bei denen keine Daten ausgetauscht werden.

Ein weiterer Punkt, der beim Austausch zu berücksichtigen ist, sind die Konvertierungen von auszutauschenden Daten in Bezug auf deren physikalischen Einheiten – d. h. Konvertierungen sowohl als Überführungen der physikalischen Einheiten ( $\text{m}^3/\text{s}$  zu  $\text{l}/\text{s}$ ) als auch komplexe Stoffgruppenumrechnungen, wie sie z. B. beim Datenaustausch unterschiedlicher Fraktionierungen des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) auftreten. Hier müssen von den Modellsystemen entsprechende Lösungen implementiert werden.

Nicht zuletzt ist die Frage der räumlichen Anbindung innerhalb des Datenaustauschs ein zentrales Thema bei gekoppelten Modellsystemen. Während hydrologische Modelle normalerweise ohne georeferenzierte Systemelemente und damit ohne georeferenzierten Datenaustausch erstellt werden, ist der Datenaustausch bei hydrodynamischen Modellen meist wegen ihrer räumlich abgebildeten Rechengitter möglich, da die Rechengitter georeferenziert sind oder diese leicht georeferenziert werden können.

Ein georeferenzierter Datenaustausch hat bei Verknüpfungen von Modellen den Vorteil, dass alle Punkte, die verknüpft werden sollen, in einer Kopplung zusammengefasst werden können. Ein Beispiel dafür ist ein Kanalnetzmodell, das alle Einleitungsstellen der Mischwasserentlastungsanlagen als georeferenzierte Punktesammlung vorhält, und das an ein Gewässermodell gekoppelt werden soll. Das Gewässermodell kann dann anhand der georeferenzierten Punktesammlung die Einleitungsstellen innerhalb seines Modells automatisch festlegen, daher wird nur eine Kopplung der Modelle benötigt. Wären die Punkte nicht georeferenziert, so müsste bei der Verknüpfung jede einzelne Einleitungsstelle gekoppelt werden, so dass mehrere Kopplungen nötig wären.

Ein georeferenzierter Datenaustausch ist vor allem bei dem Ansatz *Interfaced Model* hilfreich. Bei einem *Supermodel* werden die Verknüpfungspunkte zur gleichen Zeit modelliert, wie der gesamte Datensatz aufgestellt wird.

---

### 4.1.2 Performanz

---

Die Performanz von Simulationssystemen ist in der Modellierung schon immer von großer Wichtigkeit gewesen. Deutlich wird das bei der numerischen Modellierung im dreidimensionalen Raum bei wasserwirtschaftlichen Simulationen, welche erst in den letzten Jahren durch bessere *Central Processing Units* (CPU) der Computer bzw. *Graphical Processing Units* (GPU) der Grafikkarten eingesetzt werden.

In der iM spielt die Performanz der Simulationssysteme dementsprechend eine große Rolle. Vor allem die Anwendungsfälle der iM geben zum Teil aufgrund der Rechenzeiten vor, mit welchen Modellsystemen eine Modelldomäne abgebildet werden kann. So kann z. B. ein hydrodynamisches 3D-Gewässermodell trotz seiner guten Abbildung der Realität nicht zielführend eingesetzt werden, wenn die Belastungen durch Mischwasserüberläufe aus Kanalnetzen beurteilt werden sollen. Dies liegt daran, dass a priori unbekannt ist, welcher spezifische Regen (Form und Intensität) für den kritischsten Fall ursächlich ist. Dadurch müssen Langzeitsimulationen genutzt werden. In diesem Fall ist es zweckdienlicher, den Detaillierungsgrad des Gewässermodells zu verringern (z. B. mit einem hydrologischen Gewässermodell), um Langzeitsimulationen durchführen zu können.

Anhand dieses Beispiels ist ersichtlich, dass ein giM-System die Fähigkeit besitzen sollte, Anpassungen an den Modellsystemen vornehmen zu können, um auch bezüglich der Rechenzeiten ein angepasstes Modell aufzustellen. Diese Fähigkeit schließt ein, dass der Detaillierungsgrad einzelner Modelldomänen vereinfacht oder verfeinert werden kann.

Ziel des in dieser Arbeit entwickelten giM-Systems ist nicht, dass dieses System ausschließlich auf *High-Performance-Computer* (HPC) zum Einsatz kommt, sondern auf aktuellen Windows-PC lauffähig und anwendbar ist.

---

## 4.2 Austauschbarkeit

---

Ein giM-System sollte eine größtmögliche Flexibilität aufweisen. Neue Fragestellungen benötigen u. U. einen feineren Detaillierungsgrad von einzelnen Modellen oder aber einen größeren Detaillierungsgrad (z. B. wegen Rechenzeiten). Ein giM-System muss deshalb zum einen innerhalb der Modelldomänen eine Erweiterbarkeit und Austauschbarkeit berücksichtigen, zum anderen aber auch die Möglichkeit vorsehen, bisher unberücksichtigte Modelldomänen zu integrieren.

Im Einzelnen bedeutet das, dass die jeweiligen Modellsysteme austauschbar sein müssen. Beispielsweise sollte es möglich sein, einen modellierten Datensatz mit mehreren Kanalnetzmodellen, einem Gewässermodell und einem vereinfachten Kläranlagenmodell bei einer neuen Fragestellung, die eine detailliertere Modellierung der Kläranlagen erfordert, den schon aufgestellten Datensatz weitestgehend übernehmen zu können. In dem Beispiel soll deshalb nur das Kläranlagenmodell ausgetauscht werden können.

Des Weiteren muss die Möglichkeit zum „Freischneiden“ bestimmter Stellen im Modell vorhanden sein, um dort geeignetere Modelle einzufügen. So können beispielsweise bei Bedarf Brückenbauwerke im Gewässer berücksichtigt werden, indem die Flußquer-

schnittsverengungen hydrodynamisch modelliert werden, wobei das Gewässer weiterhin hydrologisch modelliert werden kann. Hier sollte ein giM-System die Flexibilität besitzen, das System an dieser Stelle „Freizuschneiden“, um die Brückenbauwerke mit einem hydrodynamischen Modellsystem abbilden zu können. Natürlich muss in diesem Beispiel genau abgewogen werden, inwieweit diese Verfeinerung ein besseres Ergebnis liefert oder ob der Wechsel des Detaillierungsgrads an den Schnittstellen unzulässig ist. Trotzdem ist dieses Mittel der Modellierung unbedingt in dem giM-System vorzusehen.

Das gleiche Prinzip lässt sich auch auf den im Kapitel 4.1.1 beschriebenen Datenaustausch bezüglich der Richtung anwenden. Auch wenn unidirektionaler Datenaustausch in den aktuellen Fragestellungen ausreichen würde, so sollte die Möglichkeit bestehen, einen bidirektionalen Datenaustausch nutzen zu können. Das bedeutet, dass eine sequentielle Kopplung für das giM-System ausgeschlossen wird und eine parallele Kopplung angestrebt wird.

---

### 4.3 Interdisziplinarität

---

Die iM setzt sich aus Wissen verschiedener Bereiche zusammen, insofern ist die iM eine interdisziplinäre Modellierung. In dieser Arbeit ist mit Interdisziplinarität das Zusammenwirken von unterschiedlichen Ingenieurwissenschaften, Naturwissenschaften oder Geisteswissenschaften gemeint. Wenn die Wissenschaft und Gesellschaft zusammen interagieren, wird dies als Transdisziplinarität definiert (Ostrowski, 2008) (siehe Abbildung 4.1.).

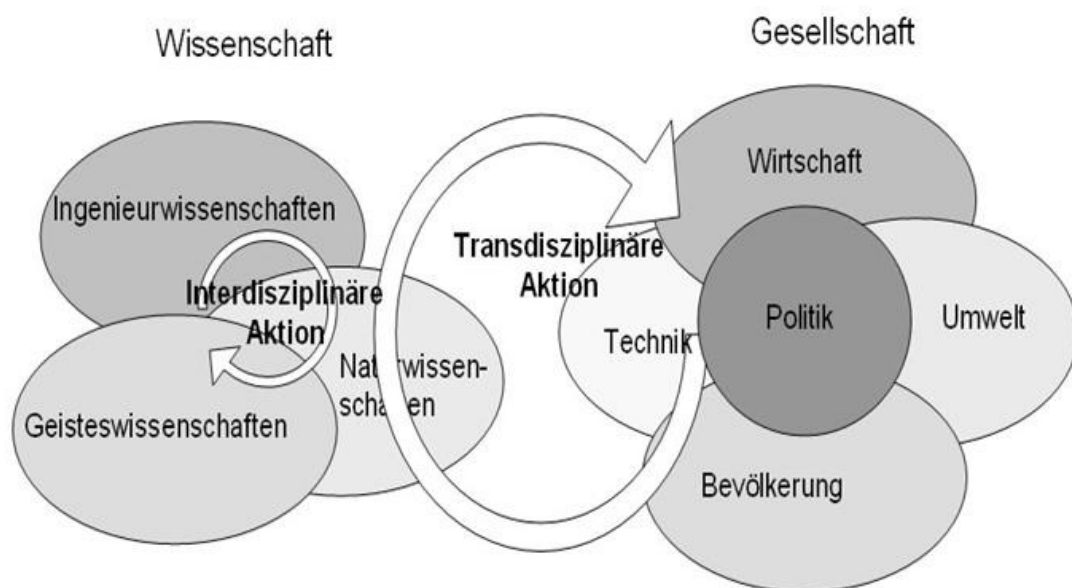


Abbildung 4.1 Inter- und Transdisziplinarität (aus (Ostrowski, 2008))

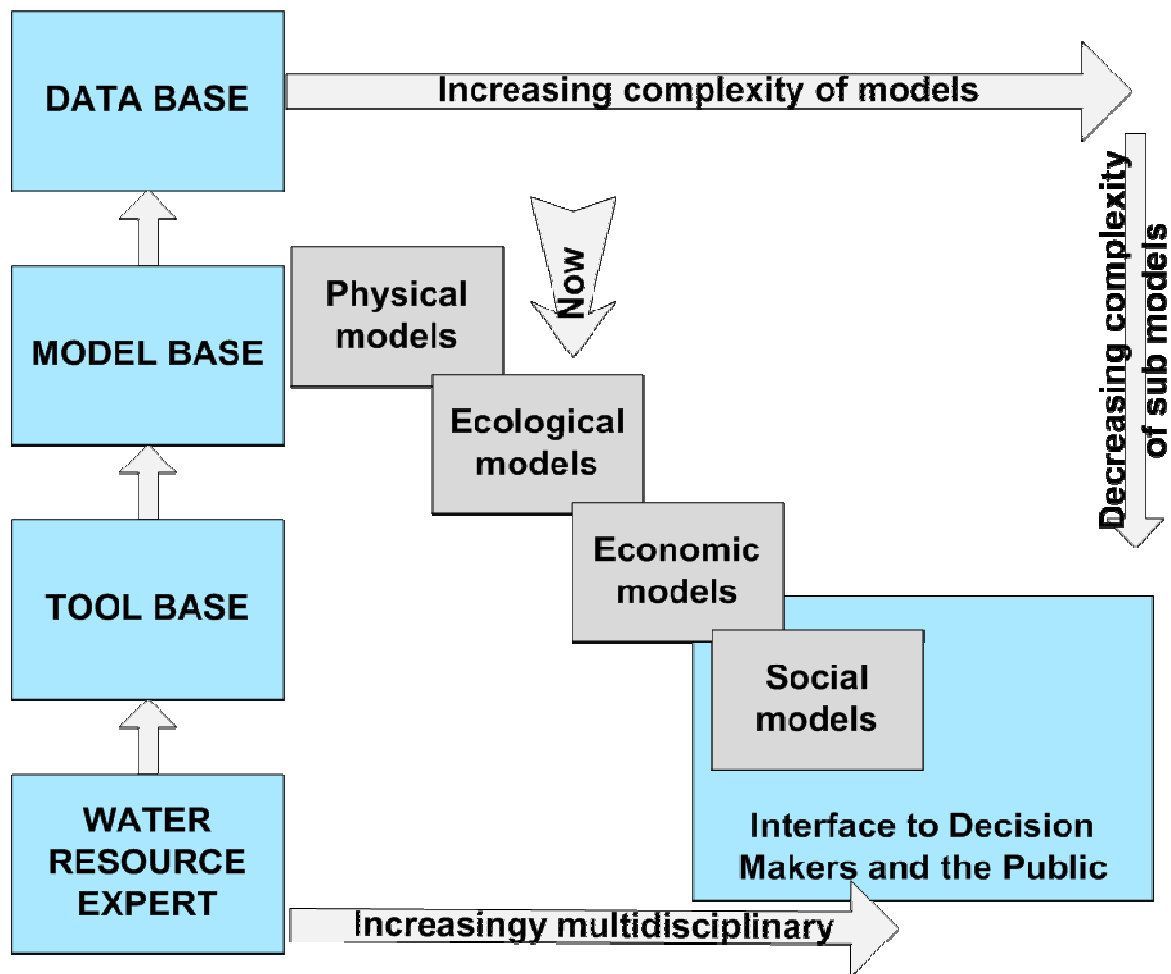


Abbildung 4.2 Komplexität der wasserwirtschaftlichen Modellierung (nach (Ostrowski, 2001))

Abbildung 4.2 zeigt eine schematische Übersicht über die Zusammenhänge und die Komplexität wasserwirtschaftlicher Modellierung. Wurde im Erscheinungsjahr der Grafik (2001) der aktuelle Stand der Forschung bei dem physikalischen Modelle gesehen, so hat sich aus heutiger Sicht der Stand auf die ökologischen Modelle verschoben. Ziel eines giM ist die Entwicklung hin zu einem System, das die zukünftigen Entwicklungen in Richtung integrierter ökonomischer Modelle und der Einbindung von Modellen aus den Sozialwissenschaftsbereichen mit einbeziehen kann.

Nachfolgend sind zwei Beispiele für eine inter- bzw. transdisziplinäre Verwendung einer iM vorgestellt. Das erste Beispiel ist ein Prognosesystem zur Beurteilung von Gewässerbelastungen in Folge zukünftigen Stadtentwicklung. Neben den typisch vertretenen Modelldomänen muss das iM-System um eine Modelldomäne erweitert werden, welche die Stadtentwicklung abbildet (siehe Abbildung 4.3). Durch die Integration der Modelldomäne Stadtentwicklung wird der Modellkopplungsansatz des *Supermodels* in seiner Anwendung schwierig. Das liegt vor allem daran, dass das Arbeiten von unterschiedlichen Experten an einem Modellsystem langwierige Einarbeitungen benötigt. Bei dem *Interfaced Model* Ansatz wiederum können alle beteiligten Experten in ihrer gewohnten Modellumgebung an ihren Fachmodellen arbeiten.

Lediglich an den Schnittstellen zu anderen Modelldomänen muss eine Interaktion mit anderen Experten stattfinden.

Ein zweites Beispiel ist ein iM-System zur Maßnahmenplanung mit dem Ziel, eine Verbesserung der Gewässersituation zu erreichen (siehe Abbildung 4.4). Denkbar ist für diesen Anwendungszweck der Anschluss eines *Decision Support Systems* (DSS) an das iM-System. Prototypische Umsetzung der Kopplung eines DSS an OpenMI-fähige Modelle existieren bereits. Diese sind aber aus Sicht des DSS modelliert und daher an ein spezifisches DSS gebunden. Eine Austauschbarkeit des genutzten DSS ist damit nicht möglich (Ostrowski et al., 2003; Jolma et al., 2005; Dirksen et al., 2005).

Die Kopplung eines DSS an die Modelle stellt grundsätzlich neue Anforderungen (Liu et al., 2008), die in dieser Arbeit nicht behandelt werden, da sie eindeutig den Rahmen der Arbeit sprengen würden. Allerdings sollte bei dem aufgebauten System prinzipiell die Möglichkeit bestehen, das giM-System mit einem DSS zu koppeln. Dabei ist mit der Kopplung gemeint, dass weder das DSS das giM-System integriert, noch das giM-System ein DSS integriert, sondern beide Systeme als gleichwertig mit einander verbunden werden. Das bedeutet, dass Ergebnisdaten strukturiert von allen Modelldomänen abrufbar sind und Parameter der Modelle von dem DSS verändert werden können.

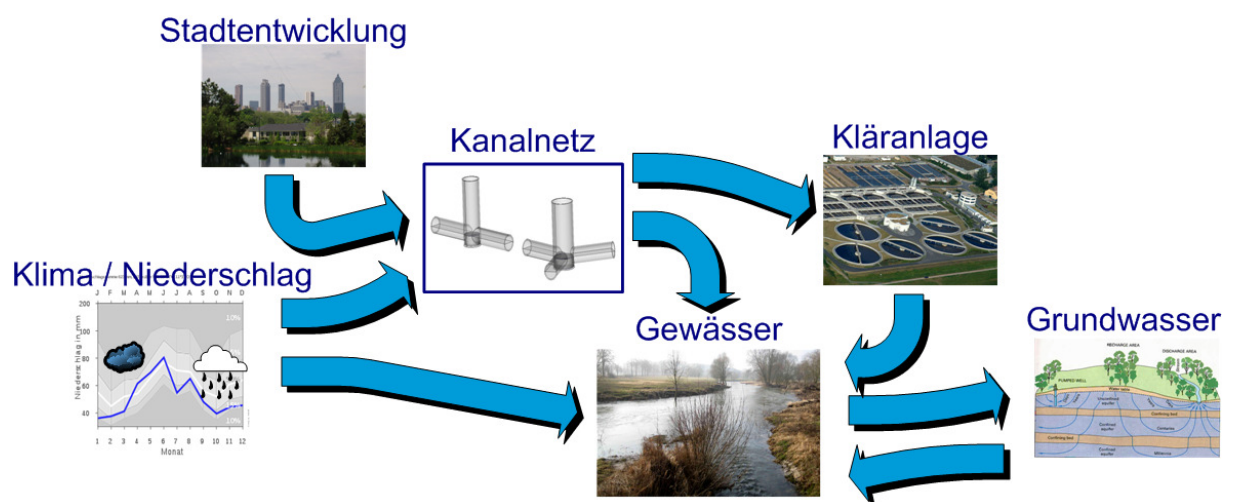


Abbildung 4.3 Schema eines Prognosesystems zur Beurteilung der Immissionen basierend auf der zukünftigen Stadtentwicklung

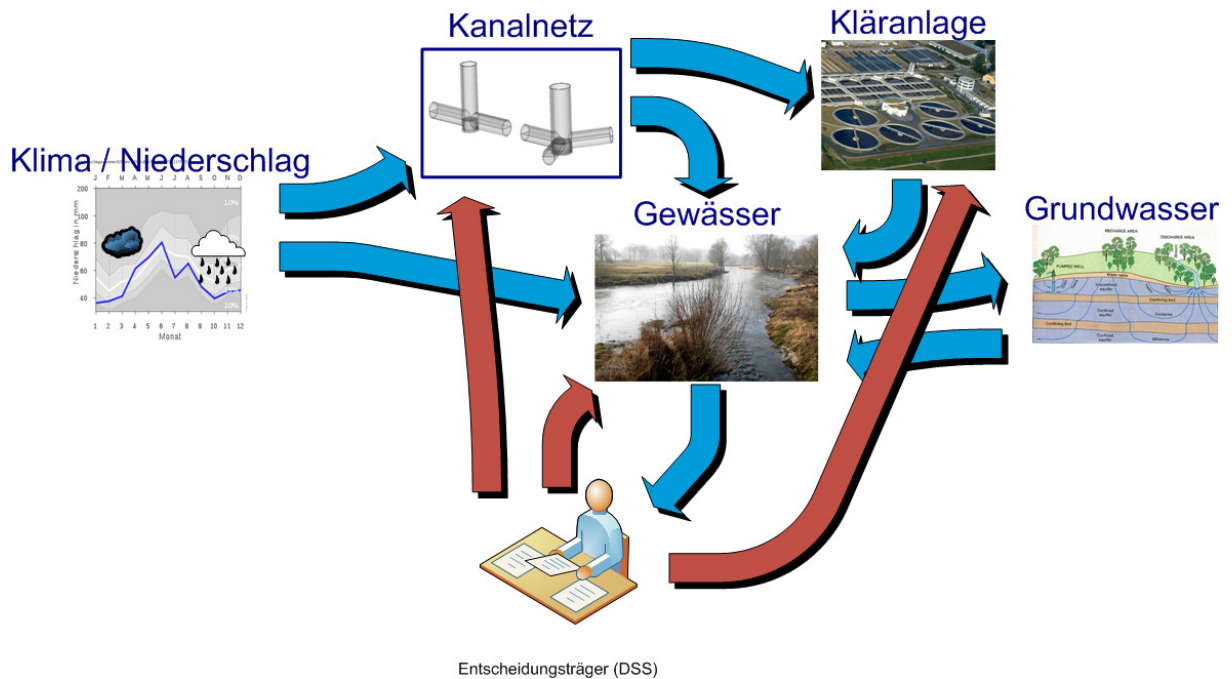


Abbildung 4.4 Schema eines integrierten Modellsystems zur Maßnahmenplanung

#### 4.4 Georeferenzierung und Benutzerfreundlichkeit

In der Regel liegen die Daten der Datenkategorien *Initialisierungsdaten* und *Randbindungen* in georeferenzierter Form vor. So werden z. B. die Daten für Bodenkennwerte in einem GIS vorgehalten. An dieser Stelle sollte ein giM-System die Möglichkeit bieten, dass die Daten direkt (oder zumindest in automatisierter Form) angebunden werden können. Dies hat den Vorteil, dass die volle Funktionalität eines GIS gerade in Bezug auf die Übersichtlichkeit für einen Anwender genutzt werden kann.

Die Visualisierung der Daten der Kategorie *Ergebnisdaten* mit einem GIS ist eine weitere wünschenswerte Anwendung eines GIS. Ein direktes Einlesen der *Ergebnisdaten* in GIS verbessert maßgeblich die Auswertung der Ergebnisse. Auch ist in den letzten Jahren auf Seiten der Hersteller von GIS-Systemen zu beobachten, dass die Visualisierung von Zeitreihen im Fokus steht. Aus diesem Grund sollten *Ergebnisdaten*, die aus einem Modellsystem mit georeferenzierten Elementen stammen, diese Referenzierung beibehalten, um direkt im GIS visualisiert werden zu können.



---

## **4.5 Verwendete Modellsysteme und weitere Komponenten zur Demonstration eines ganzheitlichen Modellierungssystems**

---

In diesem Unterkapitel werden die Modellsysteme beschrieben, die für das implementierte giM-System in Kapitel 6 verwendet werden. Die Modelle werden im Folgenden beschrieben.

---

### **4.5.1 Schmutzfrachtmodell – SMUSI**

---

Zum Zwecke der Beurteilung von Einleitungen aus Kanalnetzen in ein empfangendes Gewässer wurde in den 90er Jahren die Simulationssoftware SMUSI entwickelt. Wenn eine Einleitungsstelle aus einem Kanalnetz in Hessen beurteilt werden soll, ist eine Simulation mit SMUSI zwingend vorgeschrieben (ATV, 1992). Die aktuelle Version von SMUSI ist die Version 5.2, die im Jahr 2010 veröffentlicht wurde.

SMUSI steht für *Schmutzfrachtmodell urbaner Siedlungsgebiete* und ist ein hydrologisches Modell. Die Hydraulik wird dabei mit vereinfachten Modellansätzen abgebildet, und die stoffliche Modellierung bezieht sich ausschließlich auf die Wirkung der Retention auf die Stoffkonzentrationen. Stoffeinträge werden über einen einfachen Akkumulations- und Abtrags-Ansatz abgebildet (Muschalla et al., 2007). SMUSI ist im Rahmen des in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Forschungsvorhabens um die OpenMI-Fähigkeit erweitert worden (OpenMI Version 1.4) (Reußner et al., 2009).

Die in SMUSI modellierten Stoffgruppen sind: (1) Abfiltrierbare Stoffe (AFS), (2) chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) ohne weitere Fraktionierung, (3) Biologischer Sauerstoffbedarf (BSB), (4) Ammonium als  $\text{NH}_4\text{-N}$  und (5) Phosphor als  $\text{PO}_4\text{-P}$ . Es werden keine dynamischen Güteprozesse berücksichtigt, so dass sich die Behandlung der einzelnen Stoffgruppen nicht unterscheidet.

SMUSI ist in der Programmiersprache FORTRAN programmiert worden. Im Rahmen der Erweiterung um die OpenMI-Fähigkeit wurde SMUSI als Dynamic Link Library (DLL) kompiliert und erlaubt deshalb einen Zugriff auf den Rechenkern zur Laufzeit des Programms.

Die Ergebnisse werden als Bilanzen und Ganglinien in proprietär formatierten ASCII-Dateien ausgegeben.

---

### **4.5.2 Softwarepaket des ihwb – BlueM**

---

Am ihwb ist in den letzten Jahrzehnten aus zahlreichen Forschungs- und Dissertationsarbeiten die Programmbibliothek BlueM entstanden. BlueM beinhaltet zum einen ein hydrologisches Gewässermodell (BlueM.Sim), ein Optimierungswerkzeug (BlueM.Opt) und ein Werkzeug zur Analyse der Daten (BlueM.Analyser).

---

#### **Gewässermodell mit Gütemodellierung – BlueM.Sim**

---

BlueM.Sim ist ein am ihwb entwickeltes hydrologisches Gewässermodell. Es bildet natürliche Einzugsgebiete, Transportstrecken, Verzweigungen und urbane Siedlungsgebiete ab. Im Rahmen des in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Forschungsvorhabens wurde das Modell sowohl um

---

eine Gütemodellierung der Gewässerabschnitte – LaPipe – (Muschalla und Alex, 2010) als auch um die OpenMI-Fähigkeit (OpenMI Version 1.4) erweitert (Reußner et al., 2009).

BlueM.Sim ist in FORTRAN programmiert worden und als Dynamic Link Library (DLL) kompiliert. Das Gütemodell – LaPipe und das Simple Water Quality Model (Alex und Schütze, 2009) – ist in C++ programmiert und als zusätzliche DLL direkt in BlueM.Sim eingebunden.

Im Folgenden werden die wichtigsten verwendeten Modellansätze beschrieben.

### **Natürliche Einzugsgebiete**

Die Berechnung der Abflüsse aus natürlichen Einzugsgebieten mithilfe deterministischer Modelle erfordert neben den meteorologischen Eingangsdaten eine mathematisch-physikalische Beschreibung des Einzugsgebiets. Die beschreibenden Informationen werden für die systemhydrologische Berechnung von Belastungsbildung, Abflussbildung und Abflusskonzentration verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der in BlueM.Sim verwendeten Ansätze gibt Bach (2010).

### **Transportelemente**

Bei der Abflussberechnung der Transportelemente wird die Retention und Translation der Fließstrecke abgebildet. Für die Berechnung stehen in BlueM.Sim vier Optionen zur Verfügung (siehe Abbildung 4.5).

Angabe einer Translationszeit

Querprofileingabe mit automatisierter Berechnung der Kennlinien der Flächen-Höhen Beziehung  $A=f(h)$  und der Abfluss-Höhen Beziehung  $Q_{ab} = f(h)$  des Gewässerabschnittes

Eingabe von bekannten Kennlinien [ $A=f(h)$  und  $Q_{ab} = f(h)$ ] des Gewässerabschnittes

Verdolungstrecken: Eingabe des Rohrprofils und der Rauigkeit

**Abbildung 4.5 Berechnungsoptionen für Transportelemente in BlueM.Sim**



---

### *Nicht-linearer Speicher als systemübergreifender Baustein*

Der Abflusstransport wird mit einem Ersatzsystem berechnet, das auf einem Simulationsbaustein zur nicht-linearen Speicherberechnung basiert. Das Verfahren geht auf einen Ansatz von Ostrowski (1992) zurück.

Das Verfahren baut auf dem Prinzip des exponentiellen Euleransatzes auf, bei welchem nicht-lineare Funktionen durch einen bereichsweise linearen Polygonzug ersetzt werden. Die Funktionen werden a priori bestimmt, was eine volumengetreue analytische Lösung ermöglicht, ohne aufwendige Iterationsrechnungen während der Simulation ausführen zu müssen.

### *Gewässergütemodellierung*

BlueM.Sim verfügt über ein dynamisches Gewässergütemodell. Der Ansatz des Gütemodells beinhaltet ein Ersatzsystem für den hydraulischen Zustand in der Gewässerstrecke, das auf einem Plugflow aufbaut. Dadurch werden Volumenkörper transportiert, die als einzelne Reaktoren definiert werden. In diesen Reaktoren finden jeweils biologische und chemische Prozesse statt, die als Differentialgleichung dem Gütemodell bekannt sind.

### *Ersatzsystem LaPipe – Lagrange'scher Ansatz*

Das hydraulische Ersatzsystem hat den Namen *LaPipe* und basiert auf einem Lagrange'schen Ansatz, das heißt, im Gegensatz zum Ansatz nach Euler werden Partikel verfolgt (Muschalla und Alex, 2010). Im Fall von *LaPipe* stellen die Partikel Volumenpakete dar, die in einer Reihe durch den Gewässerabschnitt transportiert werden. Als Eingangsdaten benötigt *LaPipe* den Zufluss und den Abfluss, anhand dessen die Volumenpakete bewegt werden. Da die Volumenpakete ihre Nachbarn kennen, ist auch die Simulation der Dispersion möglich. Eine weitere Besonderheit ist die Möglichkeit, Transportstrecken aneinander zu koppeln, so dass mehrere Volumenpakete, die aus einem Abschnitt herausgenommen werden, unverändert in die neue Transportstrecke hinzugefügt werden können. Somit werden die Pakete nicht zu einem gesamten Volumenpaket zusammengefügt, sondern bleiben als einzelne Pakete in der Reihenfolge erhalten. Dadurch wird die numerische Dispersion vermindert (Alex und Schütze, 2009).

### *Übersicht über das Simple Water Quality Model (SWQM)*

Die biologischen und chemischen Prozesse finden in den einzelnen Volumenpaketen von *LaPipe* statt. In dem Simple Water Quality Modell (SWQM) sind diese Prozesse als Differentialgleichung formuliert.

Das SWQM stellt einen Kompromiss zwischen einem sehr detaillierten dynamischen Gewässergütemodell einerseits (z. B. das River Quality Modell No. 1 (Shanahan et al., 2001)) und einer erheblich einfacheren Vorgehensweise dar (z. B. Ansatz nach Streeter Phelps (Streeter und Phelps, 1925)). Dieser Kompromiss folgt dem Grundprinzip der angewandten Modellierung: „So einfach wie möglich und so detailliert wie nötig“.

---

Die mit dem SWQM modellierten Stoffgruppen sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Im Gegensatz zu dem sehr detaillierten Gewässergütemodell *River Quality Modell No. 1* (Shanahan et al., 2001) wird organisches Material (CSB) in zwei Fraktionen aufgeteilt.

Die Prozesse der biochemischen Umwandlungen, die mit SWQM abgebildet werden, sind in Abbildung 4.7 dargestellt bzw. in Abbildung 4.8 ausführlicher beschrieben. In der Gujer-Matrix-Notation stellt sich das SWQM wie Abbildung 4.9 dar.

Gelöster Sauerstoff

Ammonium/Ammoniak ( $\text{NH}_4 + \text{NH}_3$ )

gelöste, inerte CSB-Fraktion, einschließlich des nicht sedimentierten Anteils der partikulären inerten CSB-Fraktion (XI)

gelöste abbaubare CSB-Fraktion, einschließlich im Wasser transportierte abbaubare partikuläre CSB-Fraktion (XS und XH).

Konservative Substanz (d.h. keinerlei Abbauprozessen unterliegend)

Alkalinität ( $\text{HCO}_3$ -Äquivalent)

gelöste Karbonate (inorganic carbon) [ $\text{SALK} + \text{CO}_2$ ]

Abbildung 4.6 Stoffgruppen des Simple Water Quality Modell (nach (Alex und Schütze, 2009))

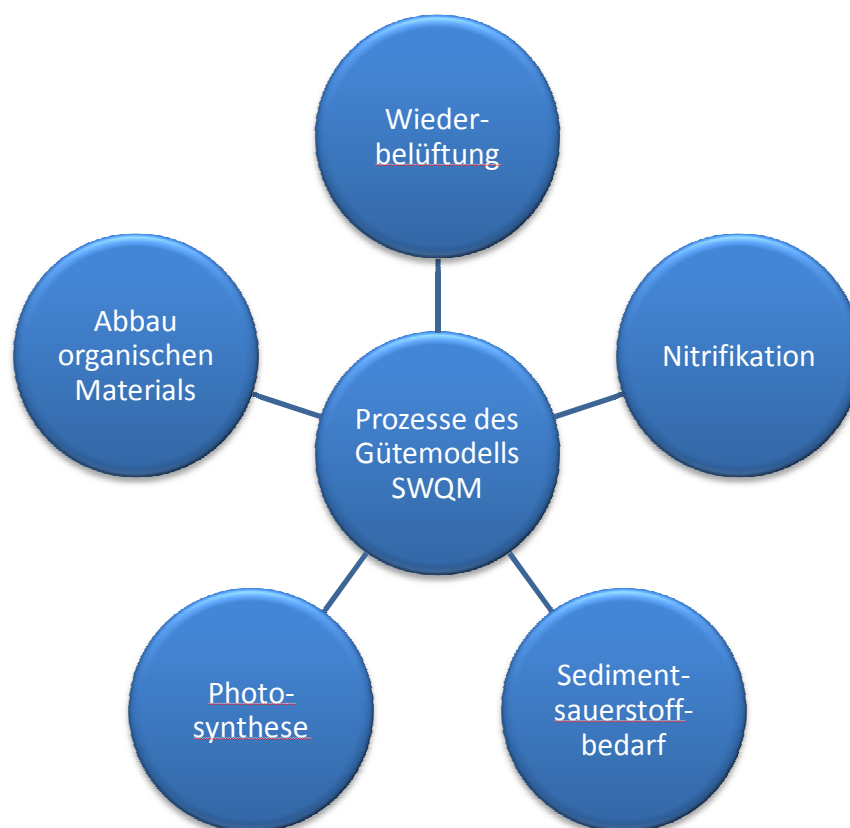


Abbildung 4.7 Abgebildete Prozesse des Simple Water Quality Modell (nach (Alex und Schütze, 2009))

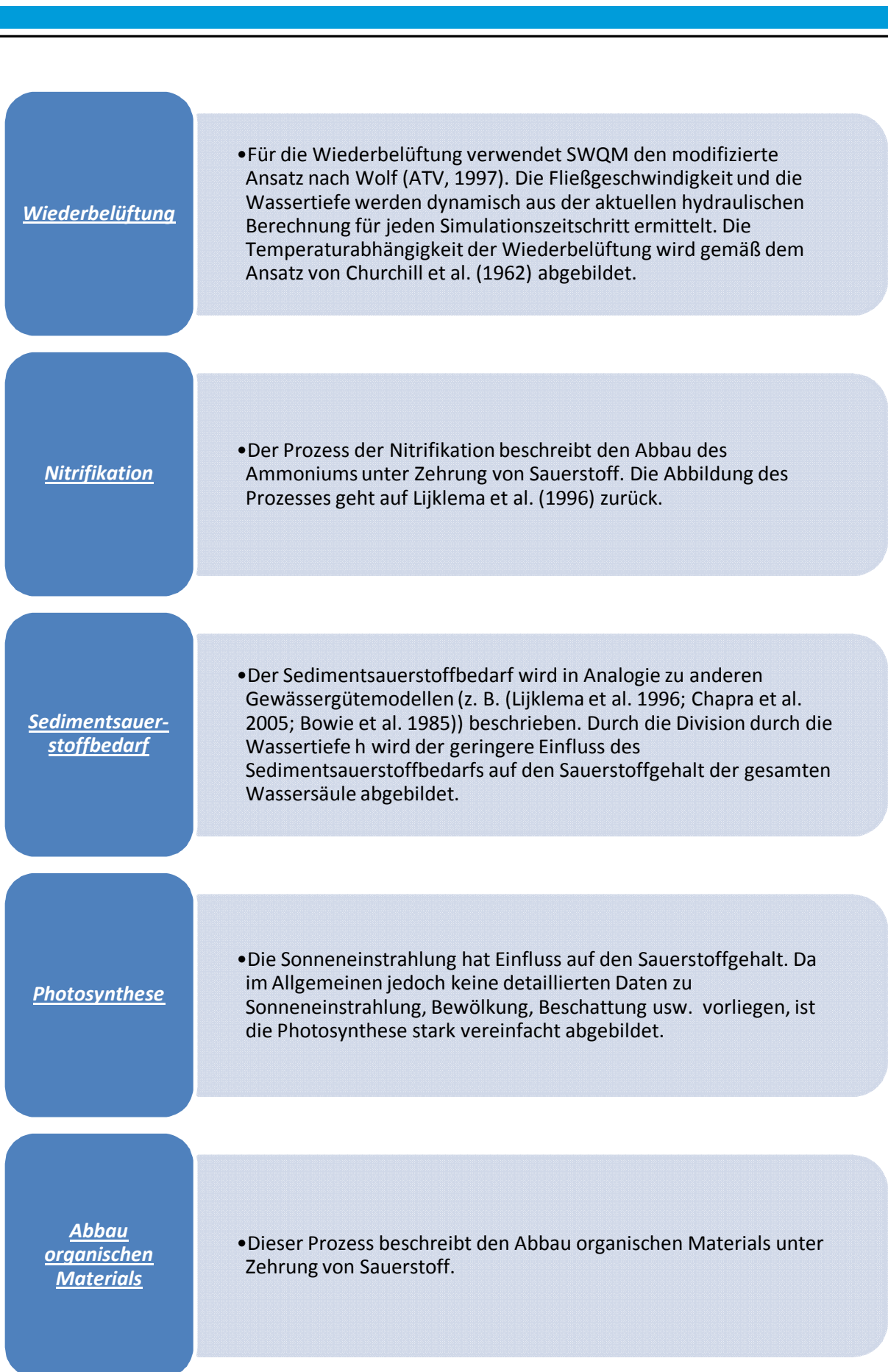


Abbildung 4.8 Beschreibung der Prozesse des Simple Water Quality Modells

	<i>SO</i>	<i>SNH</i>	<i>SI</i>	<i>SS</i>	<i>SCON</i>	<i>SALK</i>	<i>SIC</i>	<b>Rate</b>
<b>Wiederbelueftung</b>	1	0	0	0	0	0	0	$k_2 (SO_{satt} - SO) k_{2,temp} fac$
<b>Nitrifikation</b>	$Y_A \cdot \frac{64}{14}$	-1	0	$Y_A$	0	$\frac{-2}{14} fac_{SALK}$	$-1 Y_A iC_{COD}$	$k_3 \frac{SNH}{SO + K_{NO2}} \frac{SALK}{SALK + K_{SALK}} \frac{SIC}{SIC + K_{SIC}} k_{3,temp} fac$
<b>Sedimentsauerstoffbedarf</b>	-1	0	0	0	0	0	$iC_{COD}$	$\frac{SO}{SO + K_{SOD}} \frac{SOD}{h + eps} s_{od,temp} fac$
<b>Photosynthese</b>	1	0	0	0	0	0	$-1 iC_{COD}$	$\frac{alpha}{h + eps} \frac{SIC}{SIC + K_{SIC}} \frac{90 - 51}{90 \cdot 3.14159}$
<b>Abbau</b>	$-1 (1 - f_{XI}) iN_{SS} f_{XI} f_{unoxidRW}$			-1	0	$\frac{iN_{SS}}{14}$	$(1 - f_{XI}) iC_{COD} k_1 \frac{SO}{SO + K_{O2}} SS k_{1,temp} fac$	
<b>CO<sub>2</sub>_Gasaustausch</b>	0	0	0	0	0	0	1	$k_2 (CO2_{satt} - SIC + SALK) k_{2,temp} fac_{CO2} fac$

Abbildung 4.9 Prozessmatrix des Simple Water Quality Modells (Alex und Schütze, 2009)

## Konvertierungsfunktionen zum Austausch von Gütedaten

Die Modellierung der Gewässergüte wird in BlueM.Sim wie beschrieben mittels des Gewässergütemodells SWQM vorgenommen. Da sich die Stoffgruppen der Simulation des Kanalnetzmodells SMUSI von denen des SWQM unterscheiden, ist eine Konvertierung der SMUSI-Stoffgruppen nach SWQM-Stoffgruppen nötig. Dazu müssen unter anderem der CSB, der in SMUSI als Gesamt-CSB abgebildet ist, in die sieben CSB-Fractionen des SWQM überführt werden.

Entsprechend der unterschiedlichen Eigenschaften der Einleitungen und entsprechend der unterschiedlichen Datenlage werden dafür Konverterfunktionen definiert. So hat eine Einleitung aus einer Kläranlage eine andere Konverterfunktion als eine Einleitung von Regenwasser eines Trenngebiets. Die Konverterfunktionen sind im Programmsystem von SMUSI verankert.

Alle Konverterfunktionen basieren auf den Fraktionierungen entsprechend des Gewässergütemodells nach Lijklema (Schütze et al., 2002), dem Activated Sludge Model No. 3 (Henze, 2000), den Simulationsergebnissen von dynamischen Kläranlagensimulationen (Alex et al., 1999) sowie für Mischwassereinleitungen der Fraktionierung nach A131 (ATV, 1991).

## Analysekomponente – BlueM.Analyser

Im Rahmen des in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Forschungsvorhabens ist das Analysewerkzeug BlueM.Analyser entwickelt worden, das die zu analysierenden Daten über OpenMI übermittelt bekommt. Es wurde aus der Notwendigkeit heraus entwickelt, dass während Langzeitsimulationen eine sehr große Anzahl an Daten anfällt. Um dem zu begegnen, wurde der BlueM.Analyser entwickelt, der die anfallenden Daten zur Laufzeit der Simulation verarbeitet.

Das folgende Beispiel demonstriert, welche Mengen an Daten bei Langzeitsimulationen zur immissionsorientierten Beurteilung von Mischwasserüberläufen anfallen können. Um abschätzen zu können, welche Größe die Datenmenge erreicht, ist zunächst eine einfache Datenbankstruktur entwickelt worden, die als Referenz zur Speicherung der Daten genutzt wird (siehe Abbildung 4.10). Die Datenbank enthält drei Tabellen. In der Tabelle *Values* werden die Ergebniswerte gespeichert. Die Tabellen *Parameter* und *Element* enthalten die Informationen über den Ort (z. B. „Element G123“) und über die Art des Werts (z. B. „Abfluss [m³/s]“).

Ein Tupel (entspricht einer Zeile in der Tabelle) der Tabelle *Value* ist 26 Byte groß. Die Tupel der beiden anderen Tabellen sind jeweils 106 Byte groß (siehe Tabelle 4.1, Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3). in Tabelle 4.4 werden die Anzahl der Tupel dargestellt. Daraus folgt eine Größe der Ergebnisdaten von 1,5 Gigabyte an Rohdaten, bei einer Langzeitsimulation von 10 Jahren und 20 Beobachtungsstellen (siehe Tabelle 4.5).

Die Weiterbearbeitung bzw. Analyse der Daten in einer Datei mit einer Größe von über einem Gigabyte stößt bei Standardsoftware (wie z. B. Excel) an Grenzen. Aus diesem Grund wurde der BlueM.Analyser entwickelt. Das Auswertungswerkzeug wird direkt an die Modelle gekoppelt, um dann die vorgesehenen Auswertungen während der Laufzeit vorzunehmen – on-the-fly.

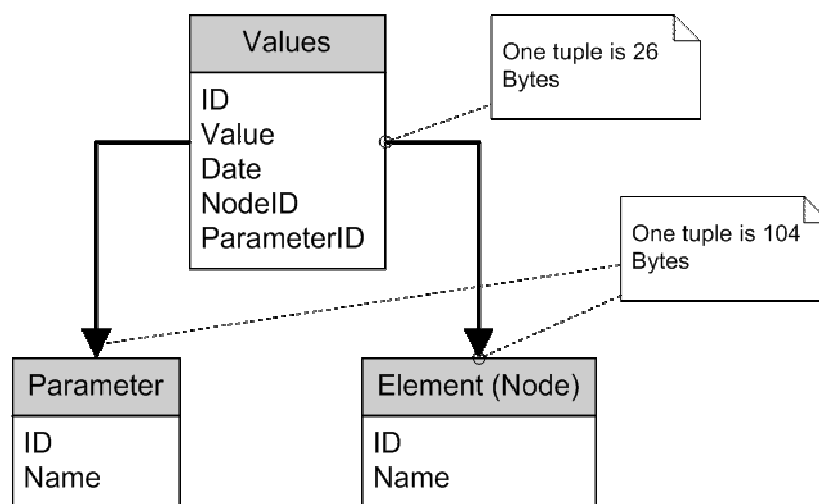


Abbildung 4.10 Einfache Datenbankstruktur zur Speicherung von Ergebnisdaten (Reußner et al., 2009)

**Tabelle 4.1 Größe von Datentypen**

Datentyp	Größe [Byte]
int	4
long	8
float	4
Double	8
Datetime	8
VARCHAR(10)	10
VARCHAR(100)	100

**Tabelle 4.2 Größe eines Tupels der Tabelle Value**

Attribute Tabelle Value	Datentyp	Größe [Byte]
value	float	4
valueID	long	8
nodeID	Int	3
ParametertypeID	int	3
Date	datetime	8
	Summe	26

Tabelle 4.3 Größe eines Tupels der Tabelle Parameter und Ort

Attribute Tabelle Element (oder Parame- ter)	Datentyp	Größe [Byte]
nodeID	int	4
NodeName	Varchar(100)	100
	Summe	104

Tabelle 4.4 Parameter zur Ermittlung der Tupelanzahl für eine Langzeitsimulation

Überprüfte Orte	20	Orte
Überprüfte Parameter	3	(Abfluss, O <sub>2</sub> und NH <sub>3</sub> -N)
Simulationszeit	10	Jahre a 5 Minuten Zeitschritt
Summe der Simulationszeitschritte	1051200	Zeitschritte

Tabelle 4.5 Berechnung der Größe der anfallenden Daten der Langzeitsimulation

Tabellen in Da- tenbank	Anzahl Tupel	Größe [Byte]
Element	20	2080
Parameter	3	312
Value	$20 \times 3 \times 1051200$	1639872000
Summe der Größe der Datenbank		1639874392 Bytes 1601440 KBytes 1564 MBytes 1,53 GBytes



Die Auswertungen im Rahmen des Forschungsvorhabens umfassen Grenzwerte für Über- und Unterschreitungen, Auswertung nach Häufigkeits-Dauerstufen-Matrix (9erMatrix) (BWK, 2008; FWR, 1994) und überschlägige Ermittlung von Hochwasserabflüssen ( $HQ_{1,2}$ ) (Verfahren nach (DVWK, 1999)).

Der BlueM.Analyser ist in seiner Softwarearchitektur so konzipiert, dass es die Möglichkeit gibt, weitere Auswertungsverfahren hinzufügen zu können. Die Umsetzung erfolgte über das *strategy pattern* (Reußner et al., 2009).

Eine Auswertung während der Simulationszeit, also ohne Wissen über die nachfolgenden Werte, ist nicht trivial. So zeigten z. B. Schindler et al. (2010), dass der Einfluss der Wahl von Schwellwerten zum Auswerten einen entscheidenden Einfluss hat. Die Thematik der statistischen Auswertung während der Simulationszeit wird allerdings in dieser Arbeit nicht weiter aufgegriffen, da es den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

### 4.5.3 Generic Engine Interface (GEI)

Eine weitere Komponente, die in dieser Arbeit für die Implementierung des giM-System genutzt wurde, ist das *Generic Engine Interface* (GEI). GEI ist eine Software der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Die BAW hat GEI entwickelt, um Initialisierungsdaten und Randbedingungen an die hydrodynamische Küstenmodellsoftware *Delft3D* über OpenMI koppeln zu können (Schade et al., 2008). Das System ist prototypisch im Einsatz und wurde bisher ausschließlich mit dem Modell *Delft3D* gekoppelt.

Das Grundprinzip von GEI ist, die unterschiedlichen Formate der Daten in einer Komponente einlesen zu können, die dann den Modellen über die Schnittstelle OpenMI zur Verfügung gestellt werden (siehe Abbildung 4.11).

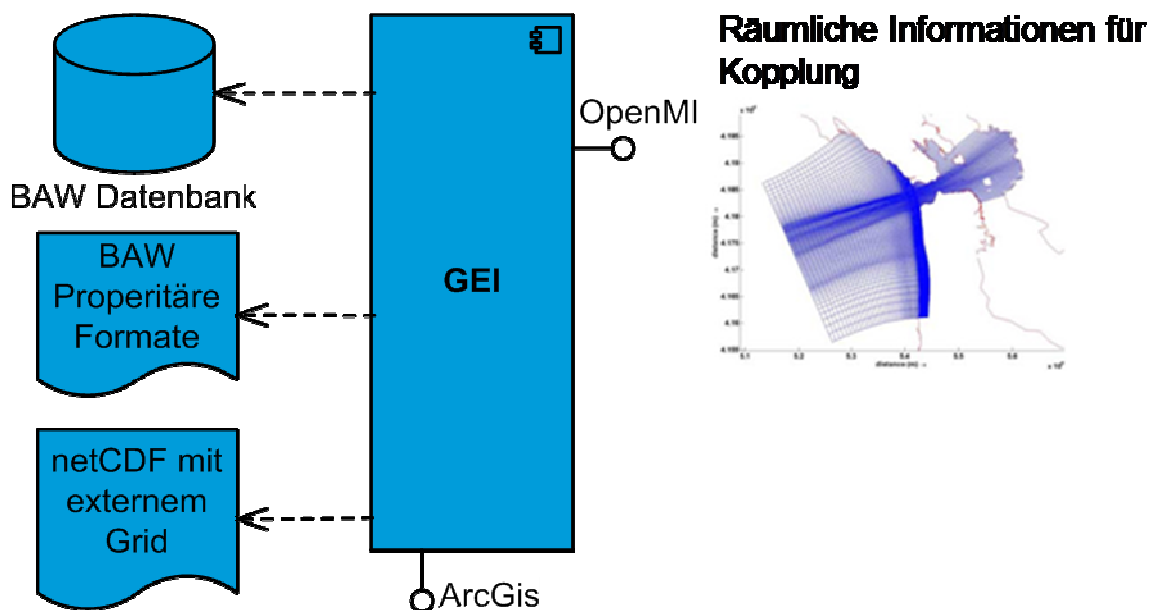


Abbildung 4.11 Aufbau und Schnittstellen des Generic Engine Interface (GEI)

---

## 4.6 Ergebnisse der Analyse und Methodik

---

In diesem Kapitel sind Thematiken behandelt worden, die für den Entwurf einer giM wichtig sind. Die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst lauten:

1. Grundsätzlich muss ein giM-System auch einen bidirektionalen Datenaustausch zulassen. Damit entfällt eine Lösung mit sequentieller Kopplung (siehe Kapitel 4.1.1).
2. Die Interdisziplinarität spielt in der iM eine große Rolle. Deshalb sollte ein giM die Möglichkeit bieten, dass Experten mit den vertrauten Werkzeugen bzw. Modellen arbeiten können. Aus diesem Grund wird der Ansatz des *Supermodels* verworfen (siehe Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3).
3. Daten liegen meist in georeferenzierter Form vor. Diese sollten wenn möglich bei der Modellkopplung genutzt werden (siehe Kapitel 4.4). Mit OpenMI steht ein Kopplungsframework zur Verfügung, das räumliche Anbindung ermöglicht.

---

## 5 Entwicklung einer ganzheitlichen integrierten Modellierung

---

„Ordnung führt zu allen Tugenden. Was aber führt zur Ordnung?“

(Georg Christoph Lichtenberg)

Im Folgenden werden die Architekturansätze eines ganzheitlichen integrierten Modellsystems (giM) vorgestellt und diskutiert. Es wird dabei zunächst gezeigt, wie die Softwarearchitektur eines einfachen Modellsystems aufgebaut ist. Dies dient auch dazu, in die Symbolik einzuführen. Darauf folgend wird das giM-System entworfen. Das System beschreibt dabei die einzelnen Komponenten ohne genauere Spezifizierung. So wird beispielsweise für die Kopplung von Daten und Modellsystemen zwar die Nutzung eines Standards vorgesehen, aber ohne diesen weiter zu konkretisieren. Welche konkreten Standards genutzt werden, wird dann im Kapitel 5.2 thematisiert.

In den folgenden Grafiken werden Symbole genutzt, die an dieser Stelle erläutert werden. Diese sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Symbole sind im Wesentlichen auf der Unified Modelling Language (UML) basierende Symbole. Mit den Pfeilen *Datenfluss* wird der Austausch von Daten und Informationen bezeichnet. Der Austausch erfolgt entweder manuell, automatisiert oder aber halb-automatisiert – z. B. mit externen Werkzeugen, die nicht an das Modellsystem gekoppelt sind.

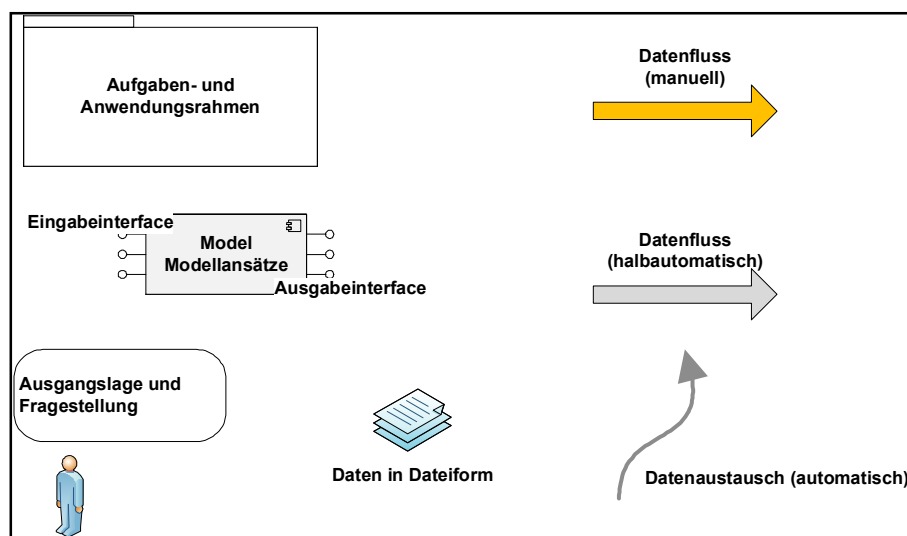


Abbildung 5.1 Legende für Architekturskizzen

---

## 5.1 Architekturentwurf eines ganzheitlichen integrierten Modellsystems

---

Aus der Analyse (Kapitel 4) geht hervor, dass für das aufzubauende giM-System der Ansatz des *Interfaced Model* gewählt wird, um die Modellkopplung umzusetzen. In diesem Kapitel werden der Weg zum Entwurf des giM-Systems und der Entwurf selbst erläutert.

---

### 5.1.1 Einfaches Modellsystem

---

Wie sieht ein einfaches Modellsystem in seiner Softwarearchitektur aus? Diese Frage wird genutzt, um in die Symbole und die Schemata der Abbildungen dieses Kapitels einzuführen. In Abbildung 5.2 ist ein einfaches Modellsystem gezeigt, das für die Abflussberechnung genutzt wird.

Das einfache Modellsystem ist für die Beantwortung der Fragestellung konzipiert worden, welche zeitliche und räumliche variierte Abflussganglinie  $Q(x,t)$  aus einem System hervorgeht, das mit einer spezifischen Regenreihe  $R(x,t)$  belastet wird. Die Eingangsdaten sind ASCII-Dateien, die von dem Benutzer erstellt werden. Dazu sind ggf. Konvertierungen und Integrationen der Daten erforderlich. Beispielsweise sind Konvertierungen von Niederschlagsdaten aus dem DWD-Format in das modellspezifische Format nötig. Oder aber bei einer Vor-Ort-Begehung werden aufgenommene handschriftliche festgehaltene Querprofildaten eines Gewässerabschnitts in die Eingangsdaten eingetragen.

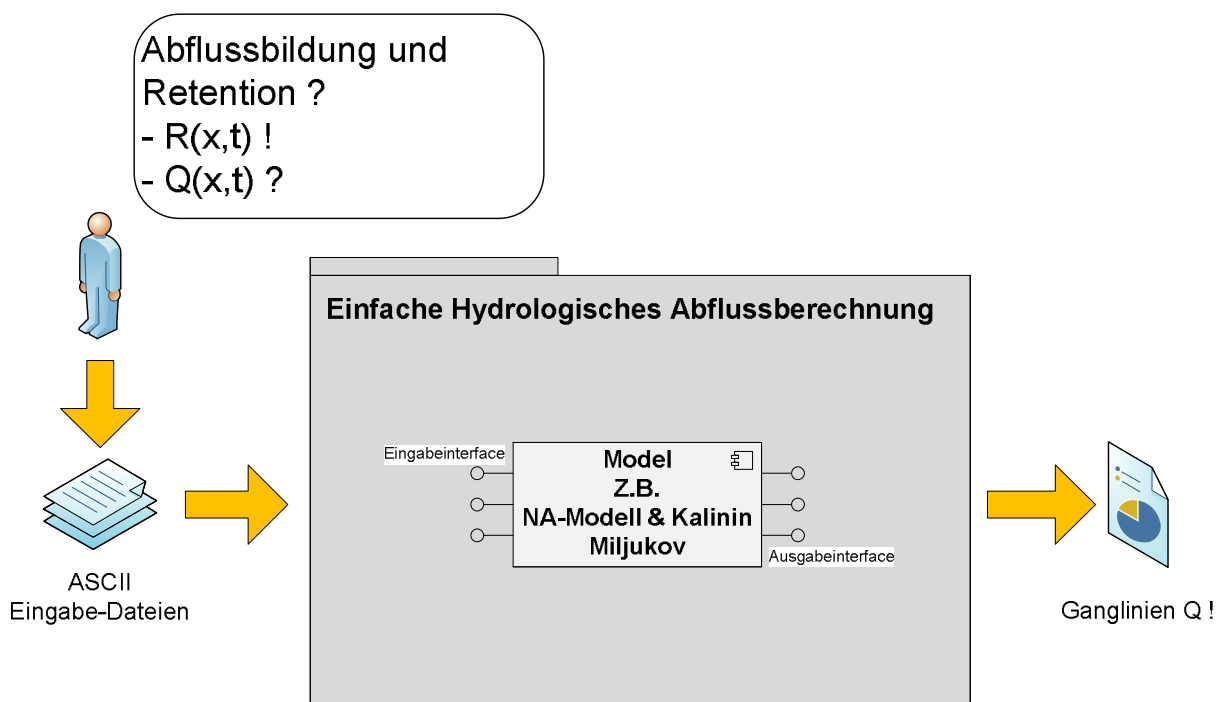


Abbildung 5.2 Architektur eines einfachen Modellsystems

---

Das Modell selbst liest die ASCII-Dateien ein und berechnet mithilfe hydrologischer Ansätze die Auswirkung des Niederschlags auf den Abfluss in dem Gewässer  $Q(x,t)$ . Diese werden in einer Ausgabedatei ausgegeben (ASCII-Datei). Um die Ergebnisdaten nutzen zu können, müssen diese wiederum aufbereitet werden, um sie in gängigen Analyse- und Visualisierungswerkzeugen weiterzuverarbeiten.

Um dieses Modellsystem als *Interfaced Model* nutzen zu können, müssen Schnittstellen implementiert werden, die den Datenaustausch mit weiteren Modellen ermöglichen. Des Weiteren muss die Simulationssteuerung von außen möglich sein. Das heißt, dass das Modell von außen den Auftrag bekommt, einen Zeitschritt zu simulieren und es dann auf weitere Instruktionen wartet. Wie dieser Umbau vorgenommen werden kann, ist von Reußner et al. (2009) beschrieben worden.

---

### 5.1.2 Integriertes Modellsystem mit dem Ansatz *Interfaced Model*

---

In Abbildung 5.3 ist ein iM-System mit dem Ansatz des *Interfaced Models* als Systemskizze gezeigt. Es ist das iM-System, das aus dem Forschungsvorhaben hervorgegangen ist, das in Kapitel 3.2.2 beschrieben ist. Die Fragestellung, die mit diesem iM-System beantwortet wird, ist aus Niederschlagsinformationen  $R(x,t)$  und Informationen zu Schmutzstoffbelastungen  $C_{\text{Potential}}(x,t)$  die resultierenden Abflussganglinien  $Q(x,t)$  und die Stoffkonzentrationsganglinien  $C(x,t)$  im Gewässer zu ermitteln.

Dabei werden die Eingangsdaten der jeweiligen Modelle als ASCII-Dateien erstellt. Diese beinhalten auch die zeitlich variablen Daten (Datenkategorie *Randbedingungen*). Die ASCII-Dateien werden dabei wie bei dem oben beschriebenen einfachen Modell manuell erstellt.

Das Gewässermodellsystem besitzt intern ein Gewässergütemodell (Kapitel 4.5.2). Es existiert somit ein Modul zur Berechnung der Gewässerhydraulik und ein angeschlossenes Modul zur Berechnung der Gewässergüte. Nach außen hin sind diese Module nicht sichtbar und stellen als Gewässermodell eine Einheit dar. Neben dem Gewässermodell enthält das iM-System ein Kanalnetzmodellsystem (SMUSI, Kapitel 4.5.2). Die Komponente zur Auswertung und Analyse ist die dritte im System enthaltene Komponente (BlueM.Analyser, Kapitel 4.5.2).

In der schematischen Darstellung sind die Modellsysteme und die Auswertungskomponente gezeigt. Dabei ist jeweils ein Kanalnetzmodellsystem und ein Gewässermodellsystem in der Grafik enthalten. Dies heißt allerdings nicht, dass nur ein Modell des jeweiligen Typs in einem iM enthalten sein darf. Vielmehr kann in einem iM eine Vielzahl von Modellen der Modellsysteme Kanalnetz und Gewässer enthalten sein.

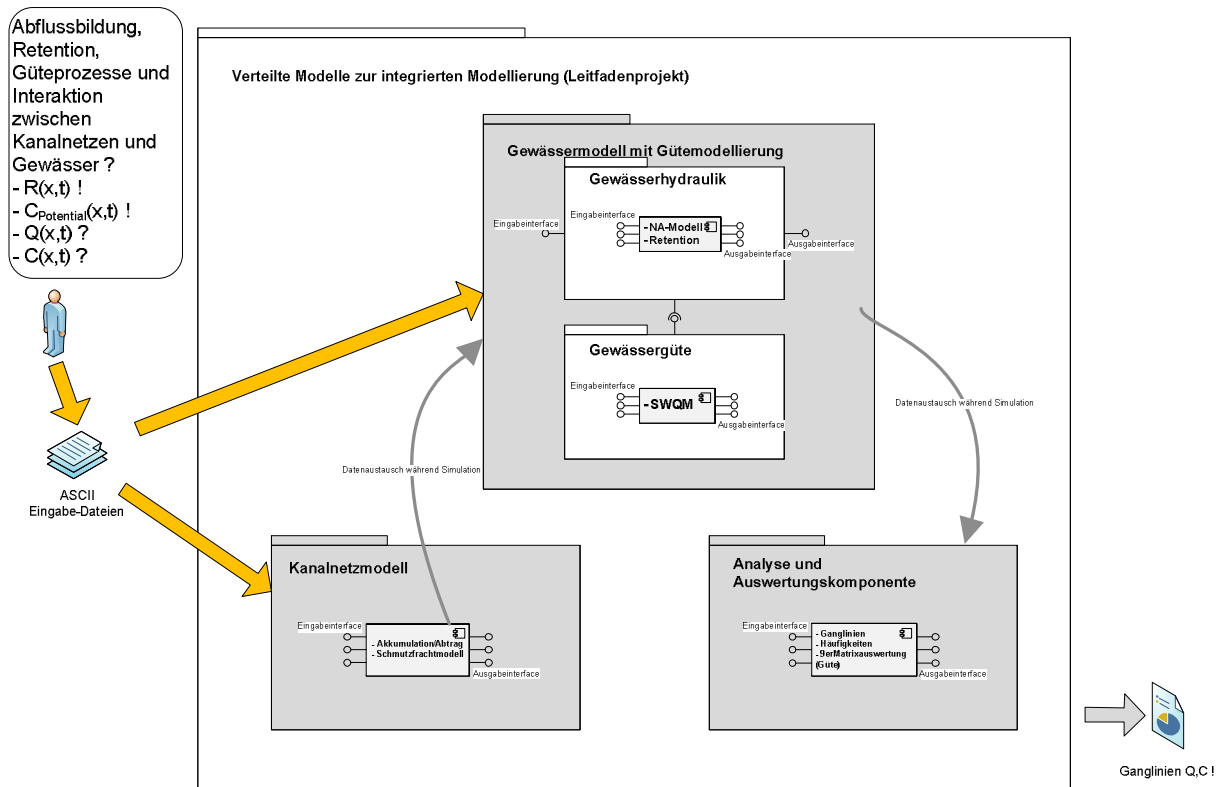


Abbildung 5.3 Architektur eines verteilten Modells

Der Datenaustausch zwischen den drei Komponenten Gewässer, Kanal und Auswertung erfolgt automatisch über parallele Modellkopplung zur Simulation. Dabei werden die Daten in jedem Simulationszeitschritt ausgetauscht. Konvertierungen bzw. Stofffraktionierungen werden dabei von den Modellkomponenten selbst übernommen. Bei asynchronen Zeitschritten, wenn das Gewässermodell beispielsweise mit einer Minute Simulationszeitschritt rechnet und das Kanalnetzmodell mit einem Zeitschritt von 5 Minuten, werden die Daten trotzdem bei jedem Zeitschritt ausgetauscht. Das heißt, ein Austausch würde bei jedem Zeitschritt des Gewässermodells stattfinden. Eine Simulation des Kanalnetzmodells findet in diesem Fall aber nur statt, wenn dies notwendig ist, also alle 5 Minuten.

Neben den Ausgabemöglichkeiten der gekoppelten Modelle gibt es durch die Auswertungs- und Analysekomponente die Möglichkeit, Ergebnisdaten in einem einheitlichen Format auszugeben. Die Ergebnisdaten werden im XML-Format ausgegeben. Durch das einheitliche Format der Ergebnisse können aus den Ergebnisdaten halbautomatisch Ganglinien visualisiert bzw. zusammengefasste Ergebnisse (z. B. Anzahl von Unterschreitungen der für Lachse letalen Sauerstoffkonzentration) präsentiert werden.

### 5.1.3 Ganzheitliches Integriertes Modellsystem mit Datenintegration

Das in dem vorherigen Kapitel vorgestellte System hat sich als brauchbares iM-System für einen praktischen Einsatz erwiesen. Allerdings hat es Schwächen, was den Umgang und die Integration von Daten angeht. Vor allem die zeitlich variablen Eingangsdaten (Datenkategorie *Randbedingungen*) werden in den modellsystemeigenen proprietären Formaten benötigt. Ge-

nau hier setzt der Entwurf für ein giM-System an. Die Datenintegration der Kategorie *Randbedingungen* wird mithilfe von Datenstandards an das integrierte Modellsystem angebunden.

Abbildung 5.4 zeigt den Ansatz, wie diese Integration erreicht werden kann. Das Modellsystem wird durch eine Datenintegrationskomponente erweitert, welche die Daten in standardisierter Form (hier als netCDF-Datei) direkt an die einzelnen Modellkomponenten anbinden kann. Der Datenaustausch zwischen der Datenintegrationskomponente und den Modellkomponenten wird dabei auf die gleiche Art und Weise vollzogen, wie die Modellkopplung selbst und ist damit *automatisch*. Der Datenaustausch zwischen den Daten und der Datenintegrationskomponente ist als *halbautomatisch* dargestellt, da die verwendeten Daten u. U. mehr Informationen besitzen müssen, als in den Rohdaten vorhanden sind. Beispielsweise beinhalten die Daten eines Regenschreibers nicht die Informationen, für welchen räumlichen Bereich diese genutzt werden können. Diese Information wird extern ermittelt (z. B. mittels Isohyetenmethode) und als zusätzliche Informationen an die Datenintegrationskomponente übergeben.

Eine weitere Änderung gegenüber dem vorherigen Architekturentwurf ist die *automatisierte* Anbindung der Ergebnisdaten. Hier werden in standardisierter Form (als netCDF Datei) neben den Werten auch Meta-Informationen (z. B. räumliche Lage) übergeben.

In Abbildung 5.5 ist die Integration des giM-Systems zusammen mit den Arbeitsschritten der Datensammlung, der Datenaufbereitung und Datenaufbereitung für Auswertungen dargestellt (Arbeitsschritte aus Kapitel 3.1). Durch die Nutzung von Standards der Datenhaltung bietet das giM-System Schnittstellen an, die von Messstellen, Datenloggern und Auswertungswerkzeugen (z. B. GIS) genutzt werden können.

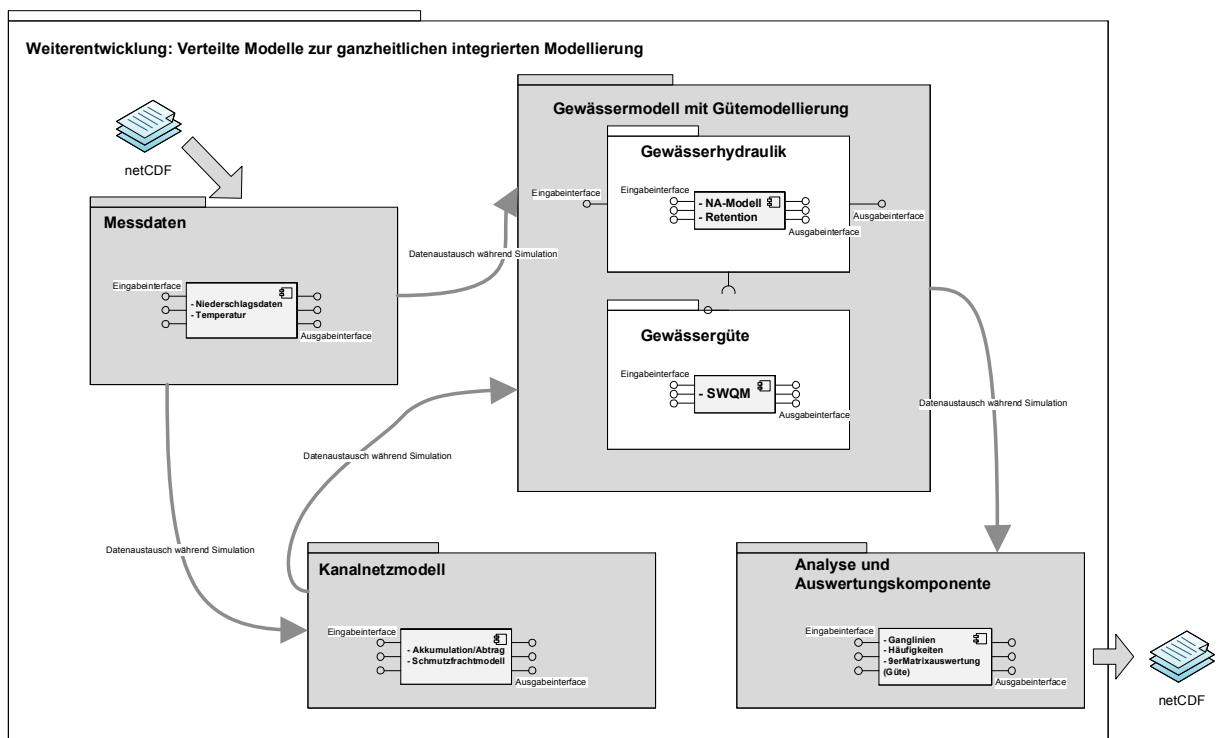


Abbildung 5.4 Architektur eines verteilten Modells mit zusätzlicher Schnittstelle für Daten

## Ganzheitliche integrierte Modellierung

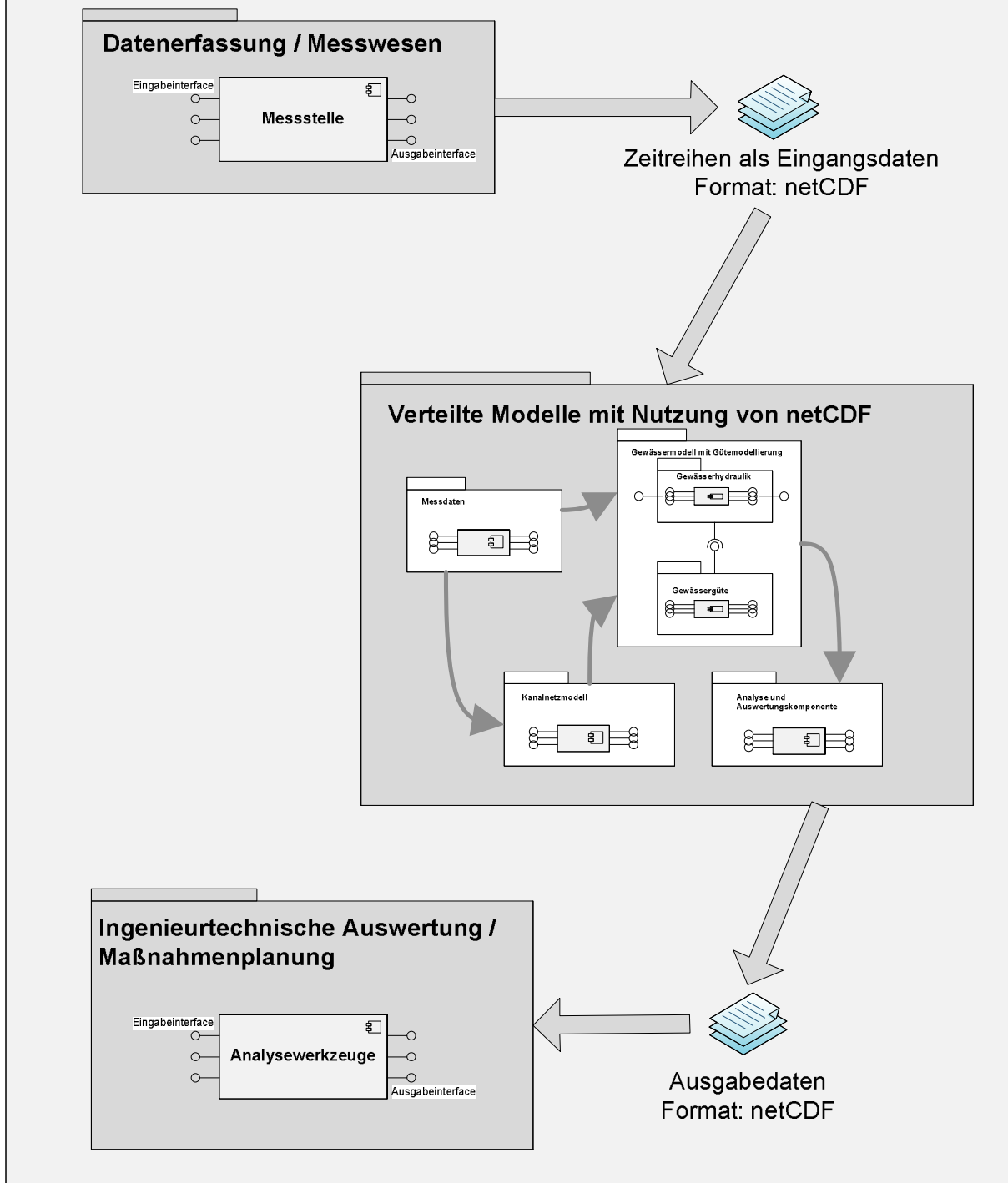


Abbildung 5.5 Architektur des ganzheitlichen integrierten Modellsystems



---

## 5.2 Nutzung vorhandener Standards in dem Architekturentwurf

---

Der vorgestellte Architekturentwurf zeigt, auf welcher Ebene die Module miteinander kommunizieren und wie die Kopplung strukturiert ist. Ohne die Nutzung von bereits etablierten Standards läuft das vorgestellte System aber Gefahr, im Prinzip wieder ein proprietäres System zu werden, auf dem kein neues System aufgebaut bzw. das System erweitert werden kann. Genauer gesagt könnte das System zwar erweitert werden, der Aufwand wäre aber mit jeder neu hinzugefügten Komponente immer größer. An dieser Stelle liegt aber der Reiz des Entwurfs. An den entscheidenden Stellen der Modellkopplung und der Datenintegration werden Standards genutzt. Die Nutzung dieser Standards und deren Kombination führt zu einem erweiterbaren System.

In Kapitel 3.1.3 wurden die Arten der Modellkopplung in Abbildung 3.6 vorgestellt. Anhand dieser Grafik wird in Abbildung 5.6 gezeigt, welche Standards und Komponenten zur Unterstützung im giM-System verwendet werden. Die Modellkopplung wird mithilfe des Standards OpenMI realisiert, mit dem bei einem Forschungsvorhaben an dem Fachgebiet ihwb gute Erfahrungen gemacht wurden (siehe Kapitel 3.2.2). Auf Seite der Datenintegration werden die Standards netCDF und SOS eingesetzt. Zur Kopplung von Initialisierungs- und Randbedingungsdaten wird die OpenMI-fähige Komponente GEI der Bundesanstalt für Wasserbau genutzt. Die Auswertungskomponente BlueM.Analyser ist erweitert worden, um die Ergebnisdaten von OpenMI in den einheitlichen Standard netCDF zu überführen.

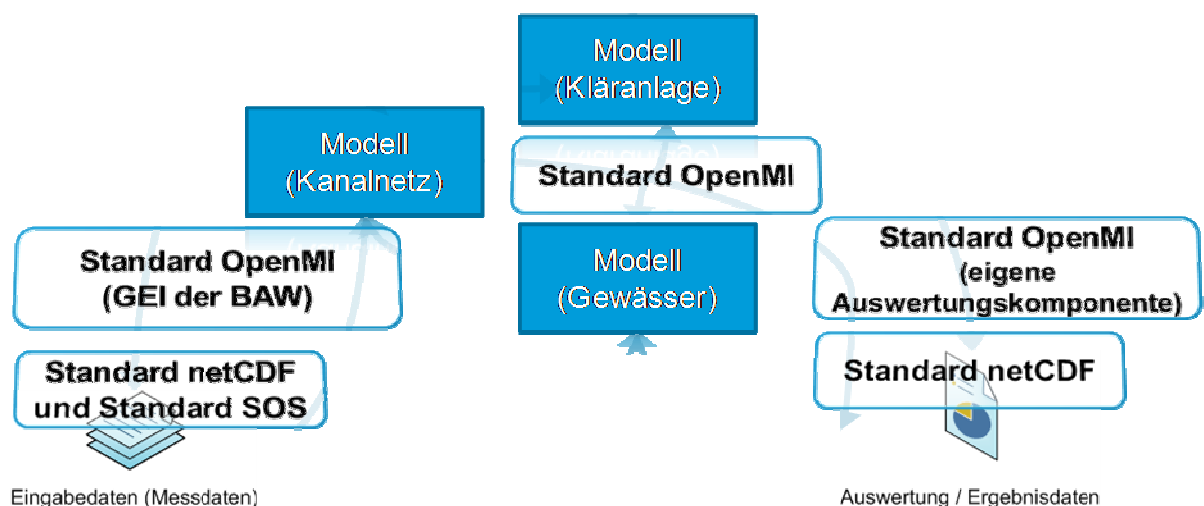
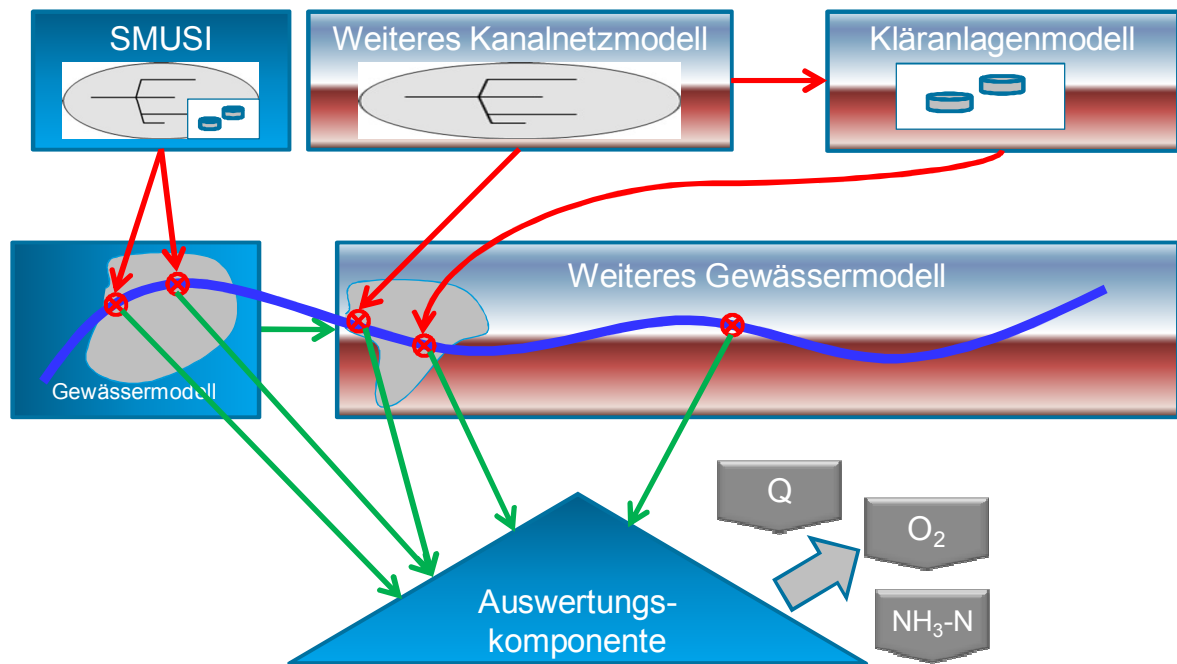


Abbildung 5.6 Nutzung multipler Standards



**Abbildung 5.7 Austauschbarkeit durch Nutzung des Standards OpenMI**

Die Nutzung von OpenMI ermöglicht es zum einen, die im Architekturentwurf vorgestellte Kopplung zu realisieren, zum anderen aber die Möglichkeit der Austauschbarkeit jeder Komponente, die z. B. ein „Freischneiden“ von Modellsystemen erlaubt (siehe Kapitel 4.2). Eine beispielhafte Erweiterung ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

Die durch die Nutzung multipler Standards zum ganzheitlichen integrierten Modellsystem erweiterte Softwarearchitektur ist in Abbildung 5.8 skizziert. In der Grafik sind die Modellsysteme und zusätzlichen Komponenten zur Datenkopplung blau dargestellt. Die genutzten Standards sind grau markiert. Die wesentliche Erweiterung ist die Datenkopplung, die in der Grafik auf der linken Seite dargestellt ist.

Das giM-System ist ein Modellsystem nach dem Ansatz des Interfaced Model zusammen einer Datenintegration die auf Standards basiert. Durch diesen Aufbau ist nicht nur jedes einzelne Teil-Modellsystem austauschbar, sondern auch die Integration von Eingangs- und Ausgangsdaten standardisiert. Eine Nachhaltigkeit im Sinne der IT-Strukturen, wie sie in der Einleitung dieser Arbeit beschrieben wurde, ist dadurch für das giM-System gewährleistet.

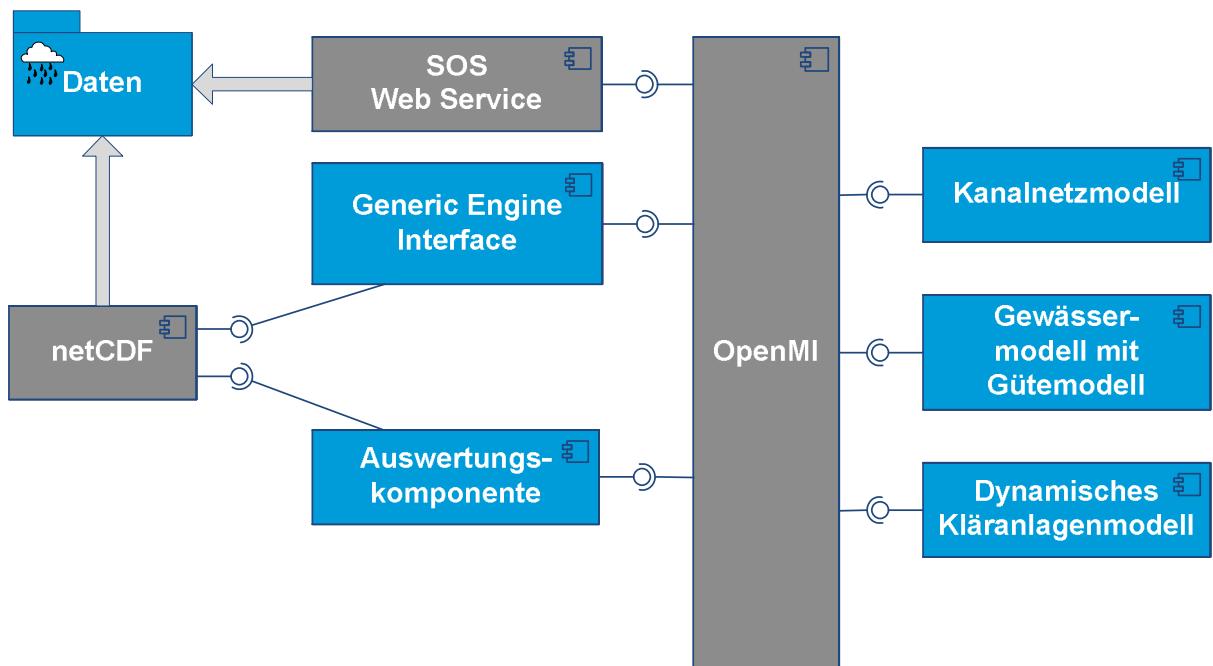


Abbildung 5.8 Nutzung multipler Standards für ein ganzheitliches integriertes Modellsystem

---

## 6 Implementierung und Demonstration eines ganzheitlichen integrierten Modellsystems

---

*„Es ist nicht genug zu wissen, man muß auch anwenden; es ist nicht genug zu wollen, man muß auch tun.“*

*(Johann Wolfgang von Goethe)*

Im vorangegangenen Kapitel ist der Architekturentwurf eines ganzheitlichen integrierten Modellierungssystems durch Nutzung und Kombination multipler Standards vorgestellt worden. Der Weg von diesem Entwurf einer Architektur hin zu einem implementierten Modellsystem ist Thema dieses Kapitels.

Kern des Ansatzes ist die Modell- und Datenkopplung mittels OpenMI zu realisieren und Datenstandards wie netCDF zu integrieren. Dafür wurden umfassende Modifikationen an Modellsystemen, Eingabekomponenten, Beispieldaten und Auswertungswerkzeugen vorgenommen. Diese werden auf den folgenden Seiten vorgestellt und beschrieben. Die Fallbeispiele am Ende dieses Kapitels demonstrieren die praktische Einsatzfähigkeit des aufgebauten Modellsystems.

---

### 6.1 Zielsetzung für das prototypische ganzheitliche integrierte Modellsystem

---

Das implementierte giM-System ist eine Erweiterung des am ihwb bestehenden Modellierungswerkzeugs zur Bewertung von Mischwasserentlastungen und deren Wirkung auf das Gewässer, welches im Rahmen des in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Forschungsvorhabens aufgebaut wurde. Bei dieser Erweiterung sind die Ziele umgesetzt, wie sie in Abbildung 6.1 dargestellt sind.

Das so aufgebaute System vereinfacht die Datenkopplung von Niederschlagsdaten an jedes Teilmodell, das als Eingangsdaten diese Niederschlagsdaten benötigt. Außerdem wird die Auswertung und Visualisierung der Ergebnisdaten durch ein einheitliches Format verbessert. Die Systemskizze mit den genutzten Modellsystemen und Komponenten zeigt Abbildung 6.2.



Gekoppeltes Modellsystem aus Kanalnetz, vereinfachter Kläranlage, natürlichen Einzugsgebieten und Gewässer



Anbindung von Niederschlagsdaten im Datenformat netCDF  
Ausgabe von Ergebnisdaten im Datenformat netCDF



Datenkopplung an Modelle über OpenMI durch Nutzung der Komponente GEI



Erweiterung der Modellsysteme um eine georeferenzierte Datenkopplung



Anbindung an GIS

Abbildung 6.1 Zielsetzung für das implementierte ganzheitliche integrierte Modellsystem

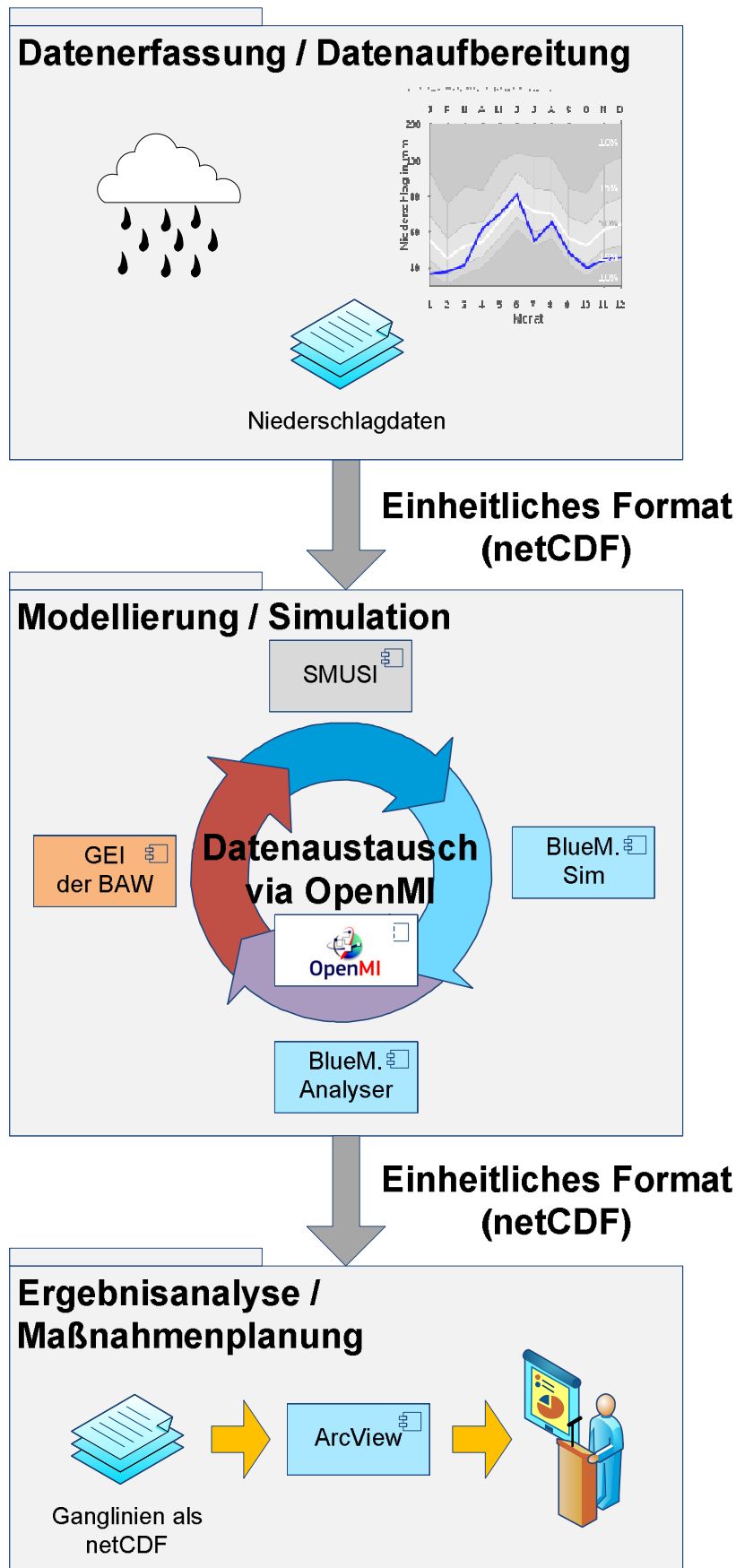


Abbildung 6.2 Implementiertes ganzheitliches integriertes Modellsystem

---

## 6.2 Arbeiten an Modellsystemen und Komponenten

---

Um das giM-System umzusetzen, wurden zahlreiche Erweiterungen und Anpassungen in den verwendeten Modellsystemen und angeschlossenen Komponenten vorgenommen. Eine Erweiterung ist die Neuentwicklung einer Georeferenzierung der Systemelemente der verwendeten Modellsysteme. Eine weitere Erweiterung ist das Hinzufügen von Schnittstellen für Niederschlagsdaten der Simulationskerne. Ferner ist das Werkzeug GEI der BAW angepasst worden, so dass volle OpenMI-Fähigkeit erreicht wurde. Des Weiteren wurde der Standard netCDF in das Gesamtsystem implementiert.

---

### 6.2.1 BlueM.Sim

---

Der Rechenkern von dem Gewässermodell BlueM.Sim kannte keine georeferenzierten Elemente. Wegen der in Kapitel 4.4 beschriebenen Gründe ist eine Georeferenzierung für ein ganzheitliches Konzept von Vorteil. Aus diesem Grund wurde BlueM.Sim so erweitert, dass die Systemelemente rudimentär um räumliche Koordinaten erweitert wurden. Dabei wurde jedem Systemelement ein X-Y-Punkt zugewiesen, der in der Eingabedatei mit der Dateienennung \*.SYS angegeben wird.

In Abbildung 6.3 ist die \*.SYS Datei dargestellt. Die Spalten X und Y enthalten die Werte für Hoch- und Rechtswert in Gauß-Krüger-Koordinaten. Bei früheren Versionen von BlueM.Sim wurden diese Spalten genutzt, um den Datensatz mittels grafischen Systemeditors zu visualisieren. In der aktuellen Version gibt es keinen Systemeditor mehr, und die Spalten waren in ihrer bisherigen Nutzung obsolet.

Die Darstellung als X-Y-Punkt ist eine sehr vereinfachte Darstellung, da Flächen besser durch einen umschließenden Polygonzug dargestellt werden sollten oder Gerinnestrecken besser durch eine Linie beschrieben werden. Allerdings ist diese Darstellung zu Demonstrationszwecken ausreichend. Bei Bedarf könnte die Repräsentationsart der räumlichen Zuordnung erweitert werden, ohne das entwickelte Gesamtkonzept zu verändern. Genutzt wird die Georeferenzierung der Systemelemente bei allen Flächentypen (natürliche Einzugsgebiete, urbane Flächen) und bei den Gerinnestrecken.

*Systemlogik (*.SYS)												
*****												
*												
* ----- ----- ----- --- --- ----- ----- ---												
*  S y s t e m   Zulauf   Ablauf   WEL BIL  X   Y  O S												
*  Beschreibung   Nr.   1 2 3   1 2 3												
* <---> <---> <---> <---> <---> <---> <---> <---> <---> <---> <---> <---> <--->												
natürl. Fläche   F001     S001   J     2538400 5927400 2 0 natürl. Fläche												
natürl. Fläche   A002     S002   J     2538000 5927600 2 0 natürl. Fläche												
natürl. Fläche   A003     S003   J     2538000 5927400 2 0 natürl. Fläche												

Abbildung 6.3 Eingabe von räumlichen Daten in der \*.SYS Datei von BlueM.Sim

Eine zusätzliche Erweiterung von BlueM.Sim sind die neu hinzugefügten Schnittstellen, um Niederschlagsdaten während der Simulation erhalten zu können. Dafür wurden zwei Schnittstellen implementiert, die beide Niederschlagsdaten erwarten. Die erste Schnittstelle erlaubt die Verknüpfung von externen Niederschlagsdaten, die über OpenMI gekoppelt werden, an eine einzelne Fläche (als ID basierte Verknüpfung also ohne räumliche Daten). Die zweite Schnittstelle fasst alle Flächen in einer Verknüpfung zusammen und stellt dabei jede einzelne als X-Y-Punkt dar. Über diese Verknüpfung kann dann über OpenMI eine räumliche Verknüpfung mit Niederschlagsdaten (implementiert ist die Übergabe als Niederschlagsintensität) so realisiert werden, dass nur eine Verknüpfung benötigt wird.

Bei dem Prinzip des Austauschs räumlich verknüpfter Daten mittels OpenMI können mehrere Datenpunkte in einer Sammlung zusammengefasst werden. Werden diese Sammlungen mit OpenMI verknüpft, so muss die Komponente, aus der die Daten entspringen, die Zuordnung der Datenpunkte übernehmen.

In Abbildung 6.4 ist dies anhand des Beispiels der Verknüpfung von Niederschlagsdaten und Einzugsgebieten eines Modells demonstriert. Dabei exportiert die sendende Komponente (der Niederschlagsdaten) alle zu exportierenden Informationen in einer Sammlung von Punkten mit Daten – rot dargestellt – (z. B. aus Regenschreibern an jedem Punkt). Die Niederschlagsdaten sollen mit Einzugsgebietsflächen eines anderen Modells verknüpft werden. Die drei X-Y-Punkte (für jede Fläche ein Punkt) sind in der Abbildung rechts oben mit blau dargestellt. Werden nun die beiden Sammlungen miteinander über OpenMI verknüpft, so muss die Quelle der Daten, also die sendende Komponente mit den Niederschlagsdaten, entscheiden, welche Werte an die drei Punkte übermittelt werden. Die einfachste Möglichkeit ist, ausschließlich bei genauer Überschneidung der Punkte die entsprechenden Werte zu übergeben. Dies ist in der Komponente GEI in der beschriebenen Form umgesetzt. Darüber hinaus könnten auch Interpolationen getätigt werden, um die Werte entsprechend an das Ziel weiterzuleiten.

Neben den Schnittstellen für die Flächen wurde auch die Schnittstelle des Exports von Informationen der Gerinneelemente um eine räumliche Zuordnung erweitert.

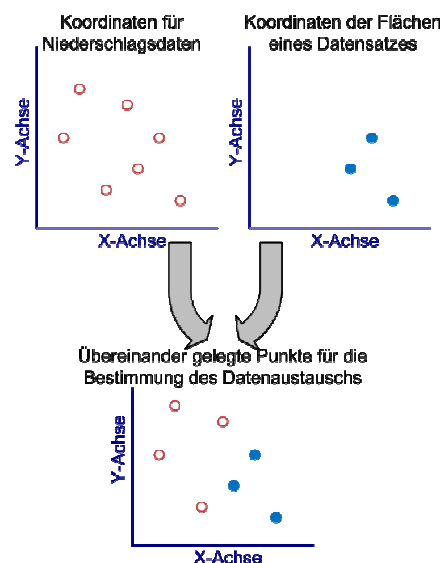


Abbildung 6.4 Satz aus Elementen und Austausch mittels OpenMI



---

## 6.2.2 SMUSI

---

Die Modifikationen von SMUSI erfolgen analog zu denen bei BlueM.Sim. Die Einzugsgebietsflächenelemente wurden für das Modellsystem georeferenziert und Schnittstellen für den Datenimport von Niederschlagsintensitäten implementiert.

---

## 6.2.3 BlueM.Analyser

---

Das Auswertungswerkzeug BlueM.Analyser ist um Ganglinienausgaben erweitert worden. Zum einen ist eine Ganglinienausgabe im Format XML hinzugefügt worden, zum anderen eine Ganglinienausgabe im Format netCDF.

Bei der Erweiterung wurde das in der Softwarearchitektur vom BlueM.Analyser vorhandene *strategy pattern* (siehe Kapitel 2.2.1) genutzt. In Abbildung 6.5 ist das Klassendiagramm des erweiterten BlueM.Analyser dargestellt. Dabei wurden zwei Klassen für die Ganglinienausgaben hinzugefügt (rot markiert) und entsprechend die Factoryklassen (*software pattern* zum Erzeugen von Objekten) erweitert.

Für den Zugriff auf den Standard netCDF wurde ein neues Programm konzipiert und entwickelt, das eine Schnittstelle von der .Net Programmiersprache C# zu den netCDF-Programm enthält (siehe Kapitel 6.3.2).

Die Ausgabe im XML-Format besitzt keine Georeferenzierung der Ausgabeelemente. Für die Ganglinienausgabe nach netCDF wurde die Georeferenzierung berücksichtigt, so dass in der netCDF-Datei gespeichert wird, von welchem Ort die Ergebniswerte stammen. Wie beschrieben exportiert BlueM.Sim zunächst für Gerinnestrecken nur einen X-Y-Punkt. Aus diesem Grund befindet sich beispielsweise der Abfluss aus dem Gerinneabschnitt im Modell exakt an der gleichen Stelle wie der Zufluss. Insofern ist die implementierte Georeferenzierung nur eine grobe räumlich Zuordnung und dient der Demonstration des Prinzips.



---

## 6.2.4 Generic Engine Interface (GEI)

---

Die Bundesanstalt für Wasserbau hat für diese Arbeit ihre OpenMI-fähige Komponente GEI zur Verfügung gestellt. Neben der kompilierten Version stand zudem der Quellcode der OpenMI Schnittstellen von GEI zur Verfügung, so dass dort auch Anpassungen vorgenommen werden konnten.

Die ursprüngliche Version von GEI wurde bisher nur in einem Projekt genutzt, wo es mit der Simulationssoftware *Delft3D* von Deltares gekoppelt wurde. Beim Koppeln mit anderer OpenMI-fähiger Software ist ein Fehler aufgetreten, der darin lag, dass Implementierungen mit proprietären Klassen aus der Entwicklungsumgebung von Deltares genutzt wurden. Diese Klassen sind im Rahmen dieser Arbeit durch Klassen aus der OpenMI Bibliothek ersetzt worden.

Des Weiteren wurde für die Demonstration des implementierten giM-Systems eine neue Daten-Entität *Niederschlagsintensität* hinzugefügt. Dazu wurden die Konfigurationsdateien von GEI erweitert. Im Anhang sind die Erweiterungen der Dictionary-Dateien von GEI gezeigt (siehe Anhang 9.1).

Die in GEI vorhandene räumliche Zuordnung bei unterschiedlichen Rechnernetzen, die über OpenMI verknüpft werden, wurde nicht verändert, so dass bei georeferenzierter Verknüpfung die auszutauschenden Punkte aufeinander liegen müssen. An dieser Stelle könnte GEI zukünftig durch intelligentes Mapping erweitert werden.

---

## 6.2.5 Parallelisierung

---

Wie in Kapitel 0 ausgeführt hat die Performanz von Simulationssystemen eine große Bedeutung. Insofern ist im Rahmen dieser Arbeit untersucht worden, inwieweit die Performanz des implementierten giM-Systems verbessert werden kann. Da die aktuelle Entwicklung von CPUs (Central Processing Unit) in die Richtung der Mehrkernprozessoren und nicht die Steigerung der Rechenleistung eines einzelnen Rechenkerns fortschreitet, liegen die Möglichkeiten zur Steigerung der Performanz zum Großteil in der Parallelisierung des Simulationsprozesses.

Da OpenMI mithilfe des Pull-Mechanismus die Simulationssysteme steuert bzw. den einzelnen Systemen die Anweisung zum Rechnen eines Zeitschritts erteilt, wäre an dieser Stelle eine Parallelisierung wünschenswert. Allerdings ist in der aktuellen Version von OpenMI keine Parallelisierung vorgesehen. Dies liegt daran, dass die Möglichkeit eines bidirektionalen Datenaustauschs neu gelöst werden müsste. Aus diesem Grund muss eine Steigerung der Performanz innerhalb der Simulationssysteme umgesetzt werden.

Die Simulationssysteme SMUSI und BlueM.Sim wurden deshalb um eine topologische Sortierung der hydrologischen Systemelemente erweitert. Daraus resultiert eine Liste von in der Weise sortierten Elementen, dass eine parallele Simulation von zumindest einigen Elementen möglich ist.

Die Parallelisierung wurde mithilfe von OpenMP – Open Multi-Processing (OAR, 1997) – realisiert. OpenMP ist eine Parallelisierung, die nach dem *Shared-Memory* Prinzip arbeitet, also nicht für Cluster, sondern für Multi-Kern-Systeme konzipiert ist.

---

In den Simulationssystemen wurde über OpenMP die Schleife der Berechnung aller Systemelemente, die auf der gleichen topologischen Stufe sind, als parallele Berechnung implementiert.

Bei nicht verzweigten Systemen (z. B. nur aneinander gereihte Gewässerabschnitte) zeigt sich allerdings, dass der *Overhead* der Parallelisierung zu längeren Rechenzeiten führt. Das liegt daran, dass die Elemente nicht in der gleichen topologischen Stufe liegen, sondern voneinander abhängen, so dass deshalb sequentiell gerechnet werden muss. Bei verzweigten Systemen (z. B. mehrere natürliche Einzugsgebiete und das dazugehörige Gewässer) können aber kürzere Rechenzeiten erzielt werden.

Eine Parallelisierung mithilfe von MPI - Message Passing Interface -, die z. B. bei Clustersystemen zur Anwendung kommt, wurde nicht untersucht.

---

## **6.3 Implementierung der Standards**

---

Das implementierte giM-System baut auf den Standards OpenMI und netCDF auf. Im Folgenden werden die Umsetzungen und die Integration der genutzten Standards in das System erläutert.

---

### **6.3.1 OpenMI**

---

Kern des implementierten giM-Systems ist die Kopplung mithilfe von OpenMI. Über OpenMI werden Modellsysteme mit weiteren Modellsystemen verknüpft, die Auswertungskomponente BlueM.Analyser erhält über die angebundenen Modellsysteme die Ergebnisdaten. Die Komponente GEI liefert den Modellsystemen die Randbedingungsdaten.

Für die Umsetzung wurde OpenMI Version 1.4 verwendet. Die Version 2.0 ist im Dezember 2010 veröffentlicht worden und würde zahlreiche Schwachstellen, die z. B. die Performanz von OpenMI betreffen, beheben. Aus diesem Grund wurde der Versuch schon mit einer Beta-Version von OpenMI 2.0 unternommen, alle OpenMI Komponenten auf die Beta-Version 2.0 anzuheben, was jedoch scheiterte, da OpenMI 2.0 zu diesem Zeitpunkt (September 2010) noch nicht in den Teilen umgesetzt wurde, welche für diese Arbeit benötigt wurden. Deshalb ist in dieser Arbeit ausschließlich OpenMI 1.4 verwendet worden.

## 6.3.2 netCDF

Als Datenformat des implementierten giM-Systems wird der Standard netCDF genutzt. Die aktuelle Version von netCDF ist Version 4.0. Allerdings wird diese Version von den meisten Programmen noch nicht unterstützt (z. B. von ArcView™), so dass für diese Arbeit die Version 3.6 verwendet wurde.

Um netCDF für den BlueM.Analyser nutzen zu können, wurde eine Schnittstelle von C# auf die netCDF Bibliotheken erstellt. Die Schnittstellen sind in Abbildung 6.6 dargestellt.

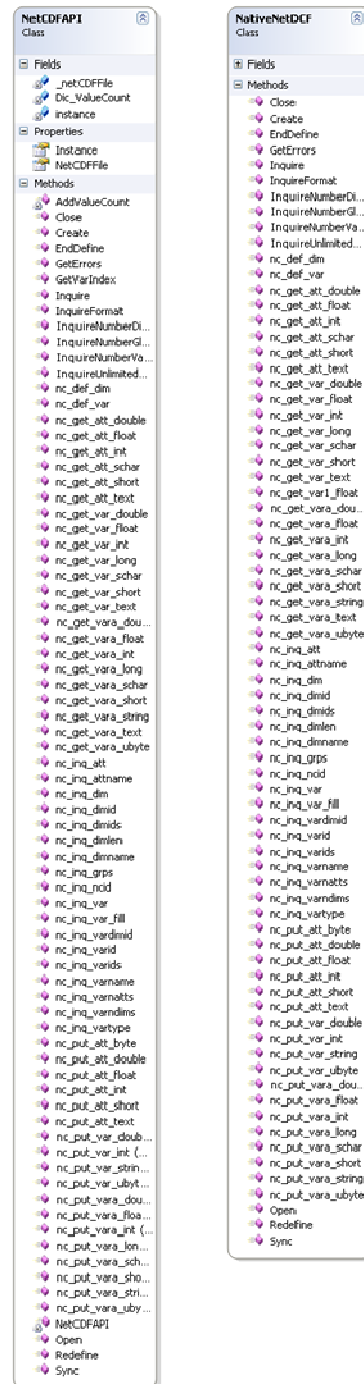


Abbildung 6.6 Schnittstellen von C# zur netCDF Bibliothek

---

## 6.4 Demonstration der ganzheitlichen integrierten Modellierung anhand von Fallbeispielen

---

Das implementierte giM-System ist anhand von zwei Fallbeispielen auf Funktionalität und Anwendbarkeit getestet worden. Dabei wurde das Hauptaugenmerk auf das giM-System gelegt und nicht auf die Aussagekraft der untersuchten Fallbeispiele.

Das erste Beispiel zeigt die Funktionalität des Systems anhand eines einfachen integrierten Modellsystems. Dabei wird ein Gewässermodell mit einem Kanalnetzmodell gekoppelt. Beide Modelle erhalten zum Zeitschritt die Niederschlagsintensität aus einer netCDF Datei. Beispielfähig wird ein Gerinneabschnitt ausgewertet.

Das zweite Beispiel ist ein realitätsnahes Fallbeispiel mit multiplen urbanen Gebieten, die an einem Gewässer liegen. Hier wird gezeigt, wie sehr die Anwendbarkeit der iM vereinfacht werden kann, indem Niederschlagsdaten in das giM-System zentral verteilt werden. Die beiden Beispiele werden nachfolgend vorgestellt.

---

### 6.4.1 Demonstration der Funktionalität anhand eines fiktiven Beispiels

---

Um die Funktionalität des aufgebauten giM-Systems zu demonstrieren, ist ein einfaches Beispiel konstruiert worden, bei dem ein realitätsnaher Kanalnetzdatensatz mit einem einfach strukturierten Gewässer gekoppelt wurde. Die Daten des Niederschlags werden mit der Komponente GEI an beide Modelle übergeben. Dafür ist ein Gitter aus sechs Punkten definiert, die jeweils eine fiktive Regenserie besitzen. Der Datensatz des Kanalnetzes wurde für eine Fläche georeferenziert. Die Fläche hat die gleichen Koordinaten wie ein Punkt des Gitters der Niederschlagsinformationen. Das Gewässermodell besitzt drei georeferenzierte Flächen. Zwei davon liegen auf den gleichen Koordinaten. Alle drei Punkte des Gewässermodells entsprechen Punkten des Niederschlagsgitters.

Die Modelle wurden über OpenMI verknüpft. Die Niederschlagsdaten sind über die Komponente GEI mit den Modellen verbunden (siehe Abbildung 6.7). Abbildung 6.8 zeigt die Verknüpfungen zwischen GEI (Niederschlag) und SMUSI (Kanalnetz). Da alle Daten georeferenziert sind, reicht eine einzelne Verknüpfung aus, bei der die Punktesammlungen der Modelle und des Niederschlags miteinander verbunden werden. Wenn die einzelnen Punkte des Niederschlagsgitters mit denen der Flächen der Modelldatensätze übereinander liegen, werden an diesen Punkten die Daten ausgetauscht (siehe auch Kapitel 6.2.1).

In Abbildung 6.9 wird die Anbindung des Gewässermodells an die Auswertungskomponente gezeigt. Hier sind die einzelnen Gerinnestrecken mit jeweils einer Verknüpfung an die Auswertungskomponente angebunden, d. h. in diesem Beispiel wird genau eine Gerinnestrecke verbunden. Als Auswertung ist die Generierung einer Ganglinie im Format netCDF ausgewählt. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.10 gezeigt. Die netCDF-Variable *Zufluss* enthält zwei Werte und zwei Zeitschritte (Variable *time*). Um die Anwendbarkeit zu demonstrieren reichen diese zwei Zeitschritte aus. Da das Gewässersystem bei zwei Zeitschritten unterhalb der Reaktionszeit auf den Niederschlag liegt, wurde die Korrektheit der übergebenen Werte direkt an den Ergebnisausgaben der Einzugsgebiete von BlueM.Sim festgestellt.

Das Fallbeispiel ist voll funktionsfähig und die Niederschlagsdaten werden korrekt übergeben. Die erzeugte Ganglinie im netCDF-Format kann direkt in GIS eingelesen werden und, da sie georeferenziert ist, auch räumlich korrekt eingeordnet werden.

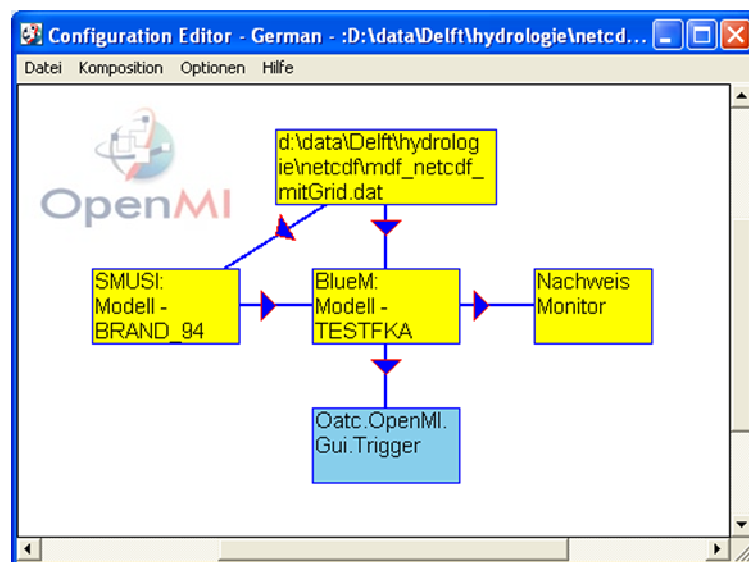


Abbildung 6.7 Mittels OpenMI verknüpftes Gesamtmodell

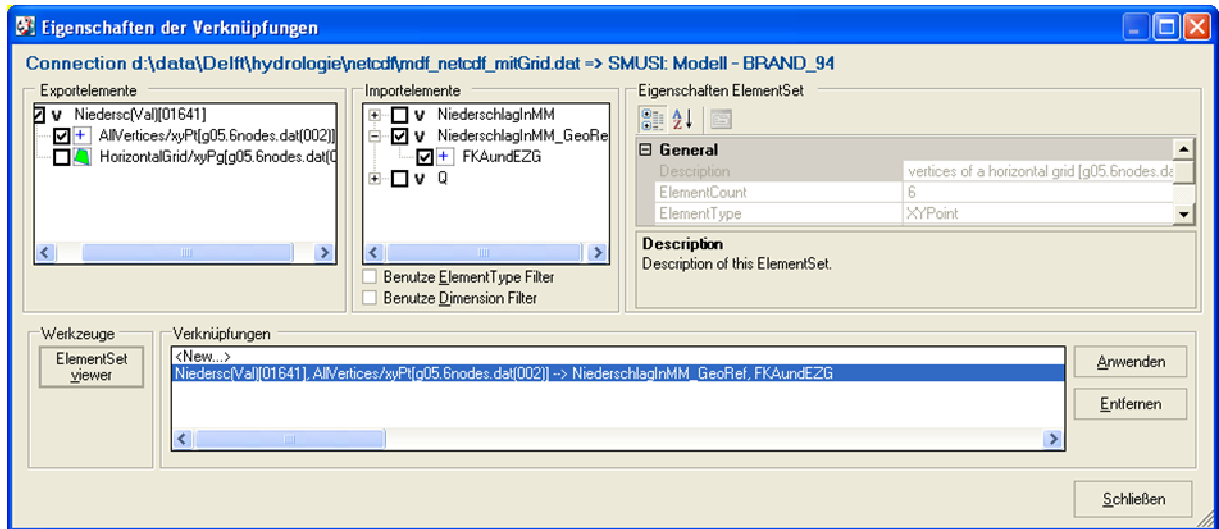


Abbildung 6.8 Verknüpfungen zwischen GEI und SMUSI

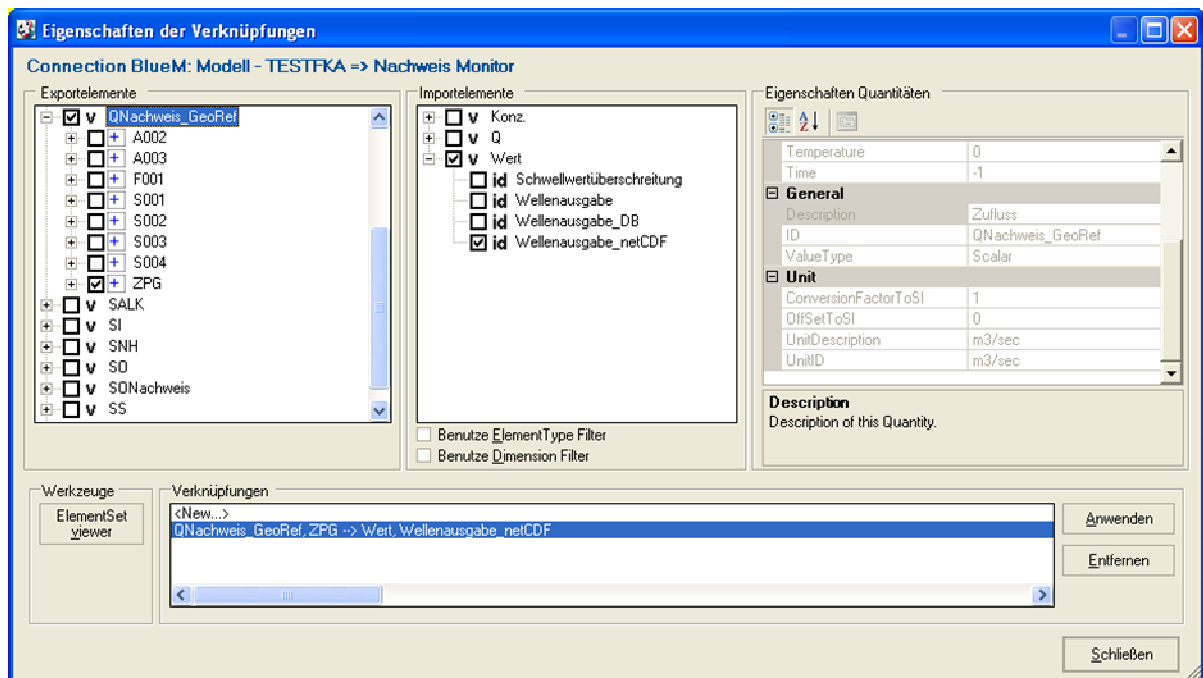


Abbildung 6.9 Anbindung des Gewässersmodells an die Auswertungskomponente



```

netcdf zpg(8)_Zufluss(1) {
dimensions:
    time = UNLIMITED ; // (2 currently)
    location = 1 ;
    location_x = 1 ;
    location_y = 1 ;
variables:
    double time(time) ;
        time:long_name = "Zeit" ;
    double location_x(location_x) ;
    double location_y(location_y) ;
    double Zufluss(time, location_x, location_y) ;
data:

    time = 49379.0590277778, 49379.0763888889 ;

    location_x = 2538400 ;

    location_y = 5927400 ;

    Zufluss =
        3.26729345321655,
        3.90327024459839 ;
}

```

**Abbildung 6.10** Generierte netCDF Datei

## 6.4.2 Demonstration der Anwendung anhand eines realen Fallbeispiels

Nachdem das vorherige Beispiel den Fokus auf der Funktionalität und Einsatzbereitschaft des aufgebauten giM-Systems gelegt hat, wird in diesem Beispiel gezeigt, wo Vorteile des giM-Systems liegen. Das Fallbeispiel ist ein realitätsgetreues integriertes Modell und damit wesentlich komplexer als das fiktive Fallbeispiel. Mit dem realen Fallbeispiel wird gezeigt, wo die Vorteile einer Georeferenzierung in einem giM-System liegen und dass die Anbindung von Eingangsdaten in einem einheitlichen Format eine wesentliche Erleichterung darstellt.

Als reales Fallbeispiel wurde als Basis ein integriertes Modell der oberen Modau (Hessen) gewählt, das von Bach (2010) aufgestellt wurde. Das integrierte Modell umfasst drei Kanalnetzmodelle (Abwasserverband Modau (AVM), Ernhofen und Brandau), die mit einem Gewässermodell gekoppelt sind. Die ruralen Flächen sind dem Gewässermodell zugeordnet. In Abbildung 6.11 sind die wichtigsten Daten zusammengefasst.

Zielsetzung des hier vorgestellten Fallbeispiels ist die Untersuchung des Einflusses von räumlich und zeitlich versetzten Regenereignissen auf maximale Abflussspitzen. Dafür werden alle Einzugsgebiete (urban und rural) mit ein-jährlichen Blockregen mit unterschiedlichen Dauerstufen belastet. Der Anfang des Regenereignisses für ein Einzugsgebiet wird dann entsprechend der Zugrichtung und Geschwindigkeit eines virtuellen Regenbandes verschoben. Untersucht werden vier Szenarien: 1. Windstille, 2. Zugrichtung von Ost nach West, 3. Zugrichtung von West nach Ost und 4. Zugrichtung von Süd nach Nord.

---

<b>Flussgebiet</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Obere Modau (bis Hochwasserrückhaltebecken Ober-Ramstadt)</li></ul>
<b>Einzugsgebiet</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 37 km<sup>2</sup><ul style="list-style-type: none"><li>• 44 % landwirtschaftliche Nutzung</li><li>• 43 % natürlichen Gebiete</li><li>• 13 % urbanisierten Gebiete</li></ul></li></ul>
<b>Fließgewässerlänge</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• ca. 14 km</li></ul>
<b>Einmündung</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Modau (Rhein)</li></ul>
<b>Kanalnetzdatensätze (SMUSI)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 3 Datensätze</li><li>• 19 Mischwasserüberläufe</li><li>• 2 Kläranlage</li></ul>

Abbildung 6.11 Steckbrief Fallbeispiel Obere Modau

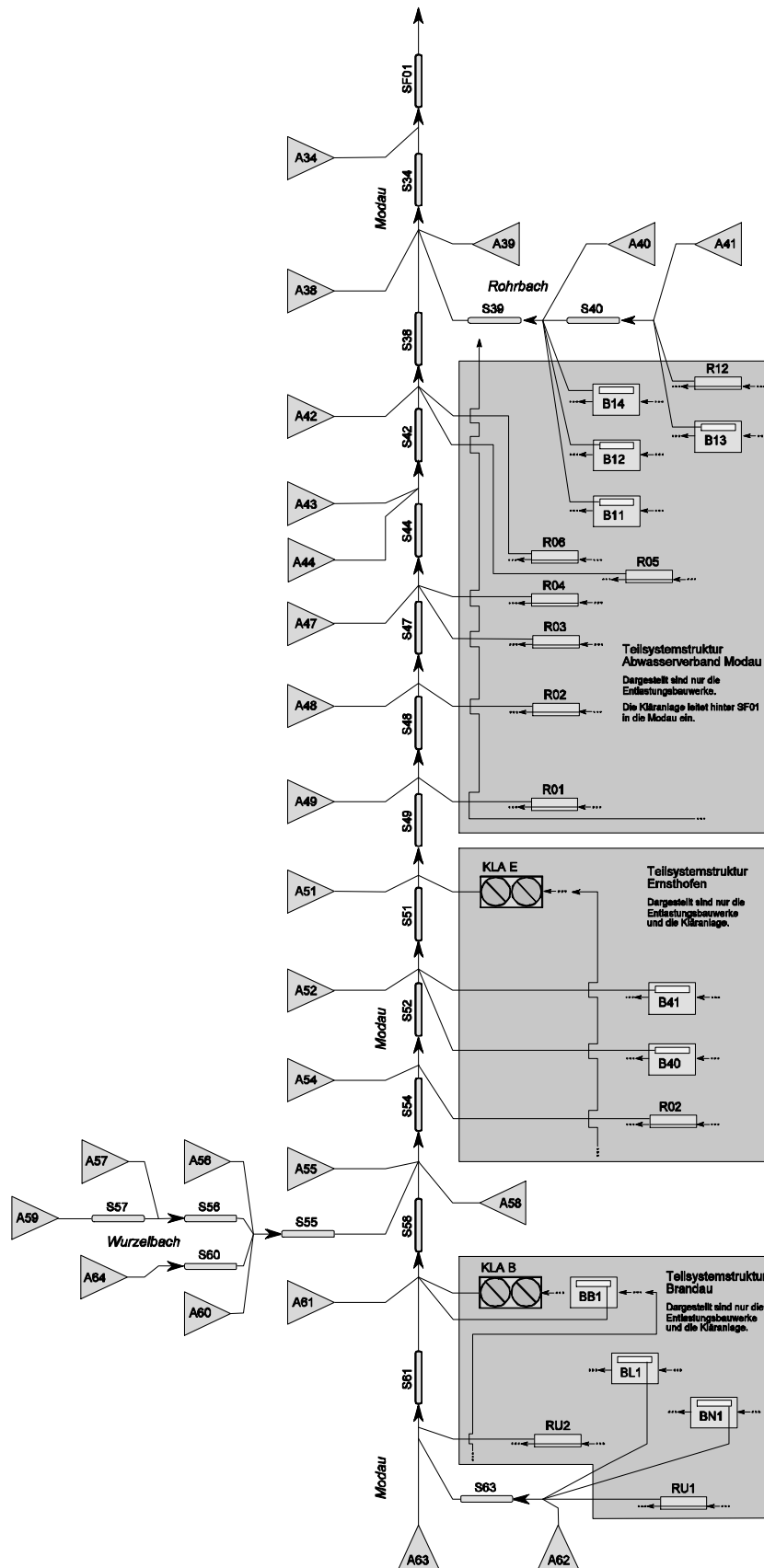


Abbildung 6.12 Systemlogik des Datensatzes obere Modau (aus (Bach, 2010))

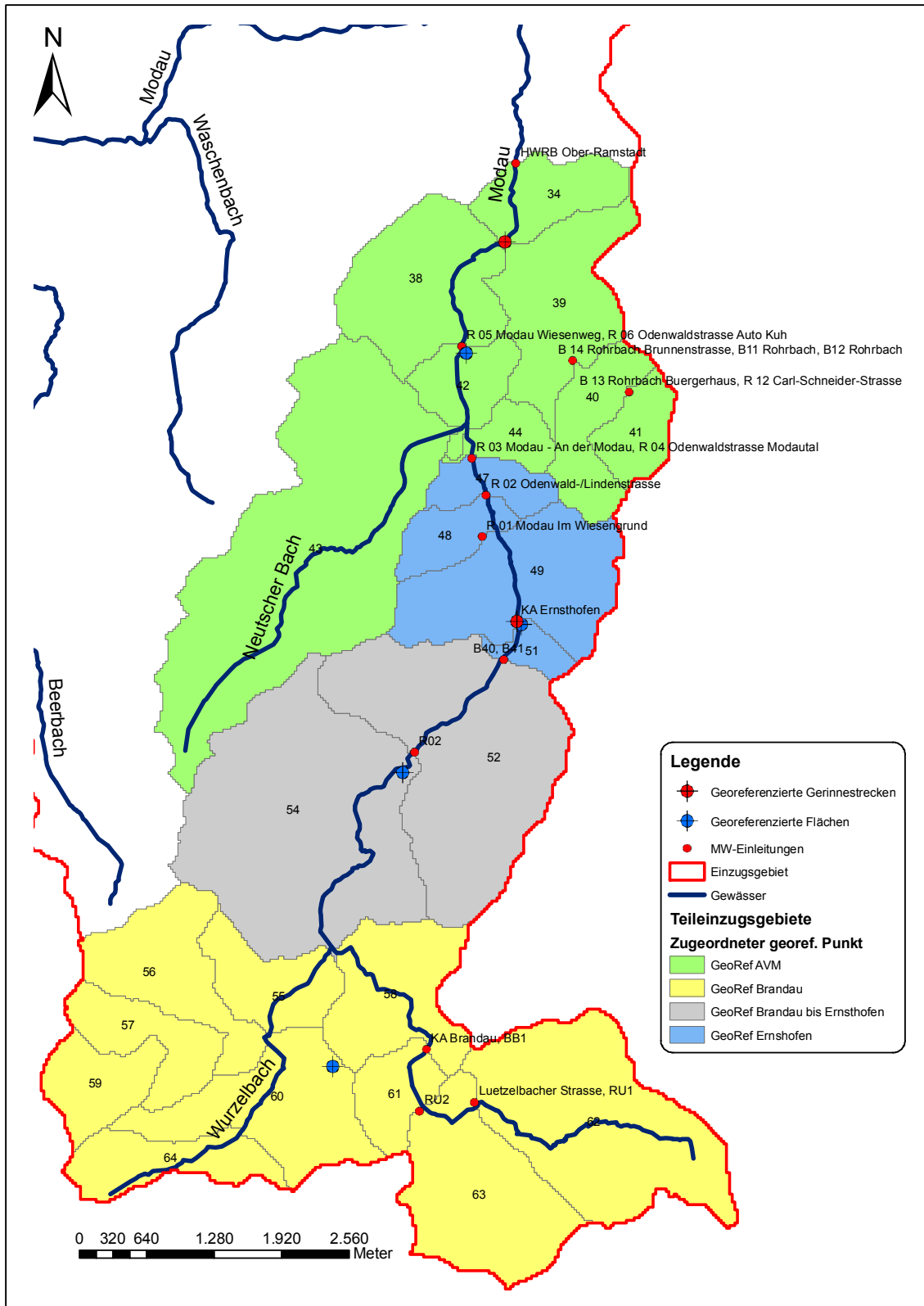


Abbildung 6.13 Modellierter Bereich der Modau und georeferenzierte Punkte

Die Systemlogik und die Verknüpfungspunkte zwischen den Kanalnetzen und dem Gewässer sind in Abbildung 6.12 als Systemskizze visualisiert. Die Elemente beginnend mit dem Buchstaben „S“ sind Gerinnestrecken, die Elemente mit „A“ bezeichnen rurale Flächen. Die Entlastungsbauwerke der Kanalnetze sind mit „R“ für Regenüberläufe und „B“ für Becken gekennzeichnet.

Der gesamte Datensatz wurde im Rahmen dieser Arbeit vereinfacht georeferenziert. So wurden alle Einzugsgebiete vier georeferenzierten Punkten zugeordnet. Die räumliche Lage der Einzugsgebiete, der Gerinnestrecken, der Mischwassereinleitung und die Lage der georeferenzierten Punkte sind in Abbildung 6.13 gezeigt. Die grobe räumliche Aufteilung mit vier Punkten ist stark vereinfacht, im Prinzip sollten alle Flächen und Strecken eine eigene Lage im Raum zugewiesen bekommen, damit belastbare Ergebnisse produziert werden können. Da dies aber für die Demonstration des giM-Systems nicht notwendig ist, wird darauf verzichtet.

Als Belastungsregen wird eine ein-jährliche Blockregenserie angesetzt, mit deren Hilfe die hydraulisch zulässige Belastung geprüft werden kann (Brehmer et al., 2009). Die Blockregen sind aus dem KOSTRA-Atlas des Deutschen Wetterdienstes (Abteilung Hydrometeorologie) gebildet worden. Dabei sind zwei unterschiedliche Blockregenserien genutzt worden, einmal für Brandau und den südlichen Teil des Gewässers (in Abbildung 6.13 als Flächen gelb markiert) und eine weitere für die weiter nördlich liegenden Flächen.

Des Weiteren sind für den Belastungsregen vier Szenarien entworfen worden (siehe Abbildung 6.14). Die Windgeschwindigkeit ist mit 4,9 m/s angesetzt worden. Dies entspricht nach DWD den mittleren Windgeschwindigkeiten in 80 m Höhe für das untersuchte Gebiet (siehe auch Anhang 9.2).

Auf das Nord-Süd-Szenario wurde verzichtet, da es entgegen der Stromrichtung verläuft und deshalb ein unkritischerer Lastfall bezogen auf die hydraulische Belastung des Gewässers erwartet wurde.

Szenario "Windstill"	<ul style="list-style-type: none"><li>•Windstille</li><li>•An jedem Punkt fällt zum gleichen Zeitpunkt der Niederschlag</li></ul>
Szenario "Ost-West"	<ul style="list-style-type: none"><li>•Wind aus Ost</li><li>•Windgeschwindigkeit 4,9 m/s</li><li>•Zugrichtung Regenband Ost-West</li></ul>
Szenario "West-Ost"	<ul style="list-style-type: none"><li>•Wind aus West</li><li>•Windgeschwindigkeit 4,9 m/s</li><li>•Zugrichtung Regenband West-Ost</li></ul>
Szenario "Süd-Nord"	<ul style="list-style-type: none"><li>•Wind aus Süd</li><li>•Windgeschwindigkeit 4,9 m/s</li><li>•Zugrichtung Regenband Süd-Nord</li></ul>

Abbildung 6.14 Untersuchte Szenarien

**Tabelle 6.1 Abstände der X-Y-Punkte nach Himmelsrichtungen**

Punkt	Blockregennr.	Abstand Süd Nord	Abstand Ost West
Brandau	1	0 km	0 km
Brandau bis Ernsthofen	2	2,8 km	0,7 km
Ernsthofen	2	4,2 km	1,8 km
AVM	2	6,8 km	1,3 km

Für dieses Beispiel wurde zu Grunde gelegt, dass die Windgeschwindigkeit gleich der Wolkengeschwindigkeit ist. Um für die Szenarien die zeitliche Verzögerung der Niederschlagsereignisse für die einzelnen Einzugsgebiete zu ermitteln, werden daher zuerst die räumlichen Abstände der Flächen festgestellt, um dann mittels der Wolkengeschwindigkeit die Zeiten zu bestimmen, wie lange eine Wolke braucht, um das nächste Einzugsgebiet zu erreichen. Maßeinheit der Zeiten ist dabei die Zeitschrittlänge der Simulation (5 Minuten). Tabelle 6.1 zeigt die Abstände der Punkte in Nord-Süd und Ost-West Richtung, mit denen die Datensätze georeferenziert wurden. Da die Zeitschrittlänge der Simulation fünf Minuten ist und in fünf Minuten ein Regenband mit der Geschwindigkeit von 4,9 m/s sich um 1,47 km weiterbewegt, ergeben sich für die Szenarien die in Abbildung 6.16, Abbildung 6.17 und Abbildung 6.18 dargestellten zeitlichen Verschiebungen der Blockregenserien. Die Verschiebungen sind in den Grafiken als Anzahl der Zeitschritte dargestellt, d. h. bei dem Szenario West-Ost fällt beim georeferenzierten Punkt bei Brandau zum frühesten Zeitpunkt der Niederschlag (0 Zeitschritte). Bei den übrigen Punkten fällt der Regen einen Zeitschritt später (1 Zeitschritt). Bei dem Szenario Süd-Nord bewegt sich das Regenband in der gleichen Richtung, wie die Fließrichtung der Modau. In diesem Szenario zeigen sich auch die größten zeitlichen Verschiebungen des Niederschlags. Abbildung 6.15 zeigt einen Auszug der zugehörigen netCDF-Datei, welche die Niederschlagsdaten enthält. In dem Datenbereich sind die Verschiebungen anhand der Zeilen zu erkennen.



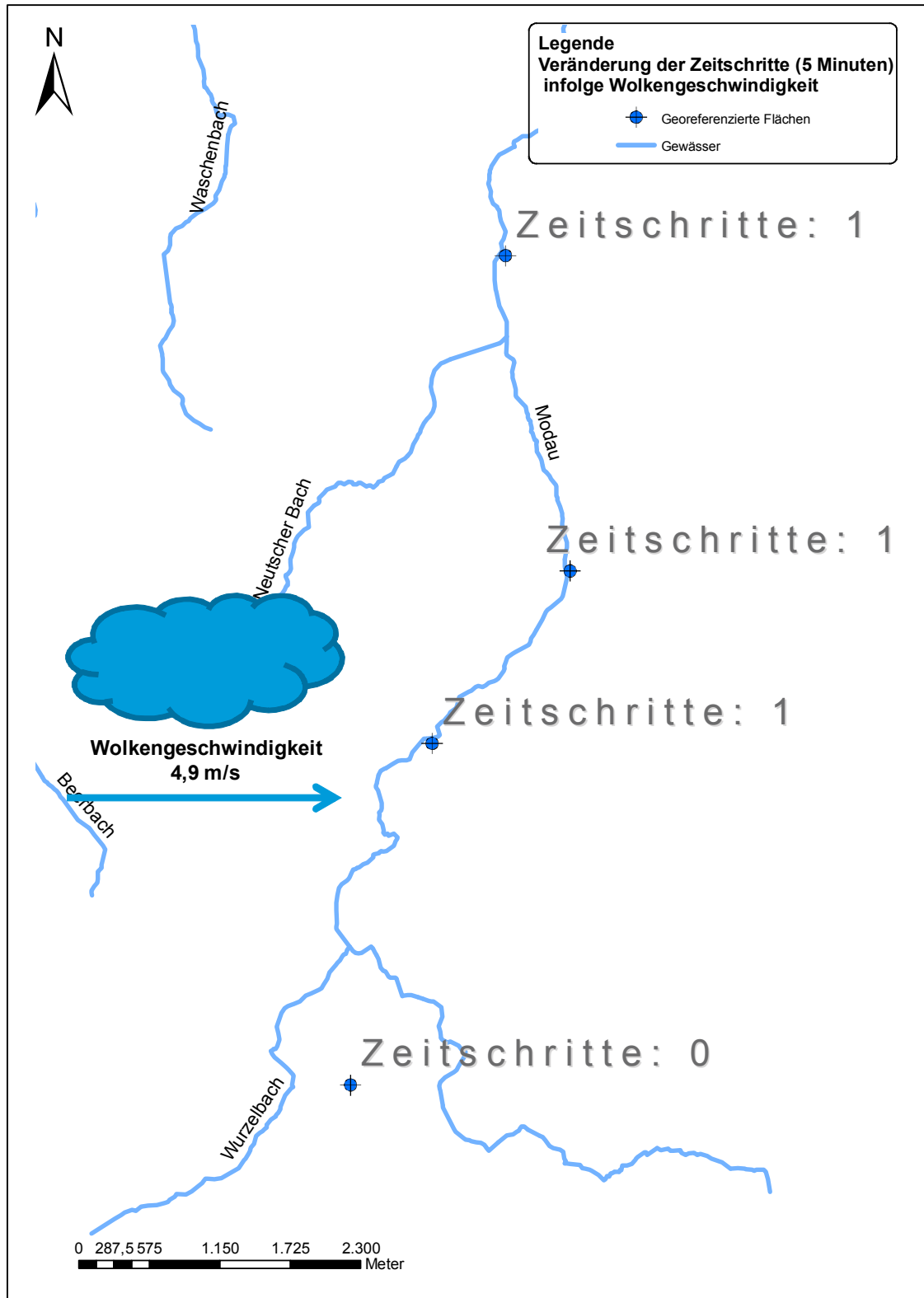


Abbildung 6.16 Zugrichtung des Niederschlags und resultierende Änderungen der Zeitschritte  
 (West nach Ost)



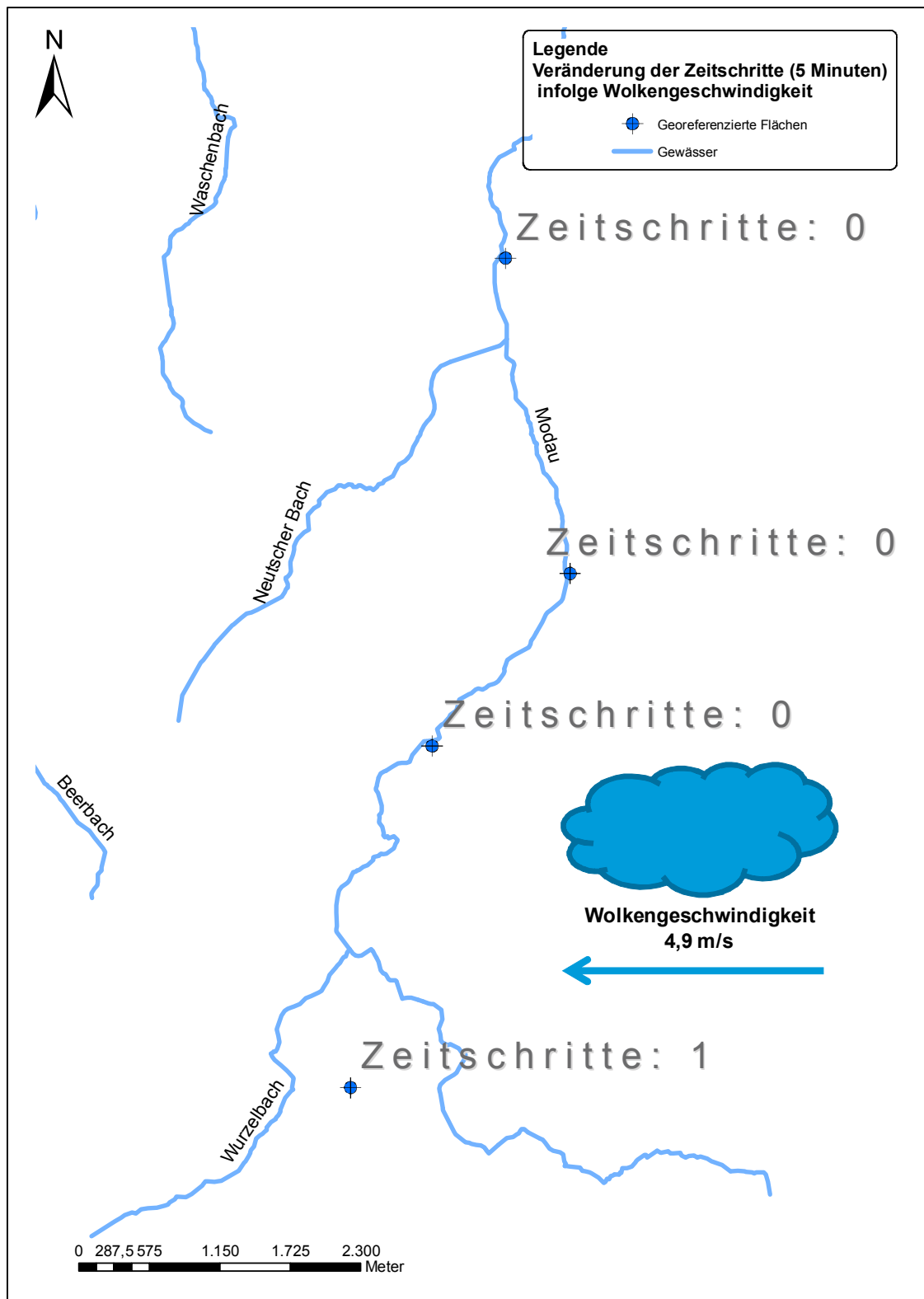


Abbildung 6.17 Zugrichtung des Niederschlags und resultierende Änderungen der Zeitschritte  
 (Ost nach West)

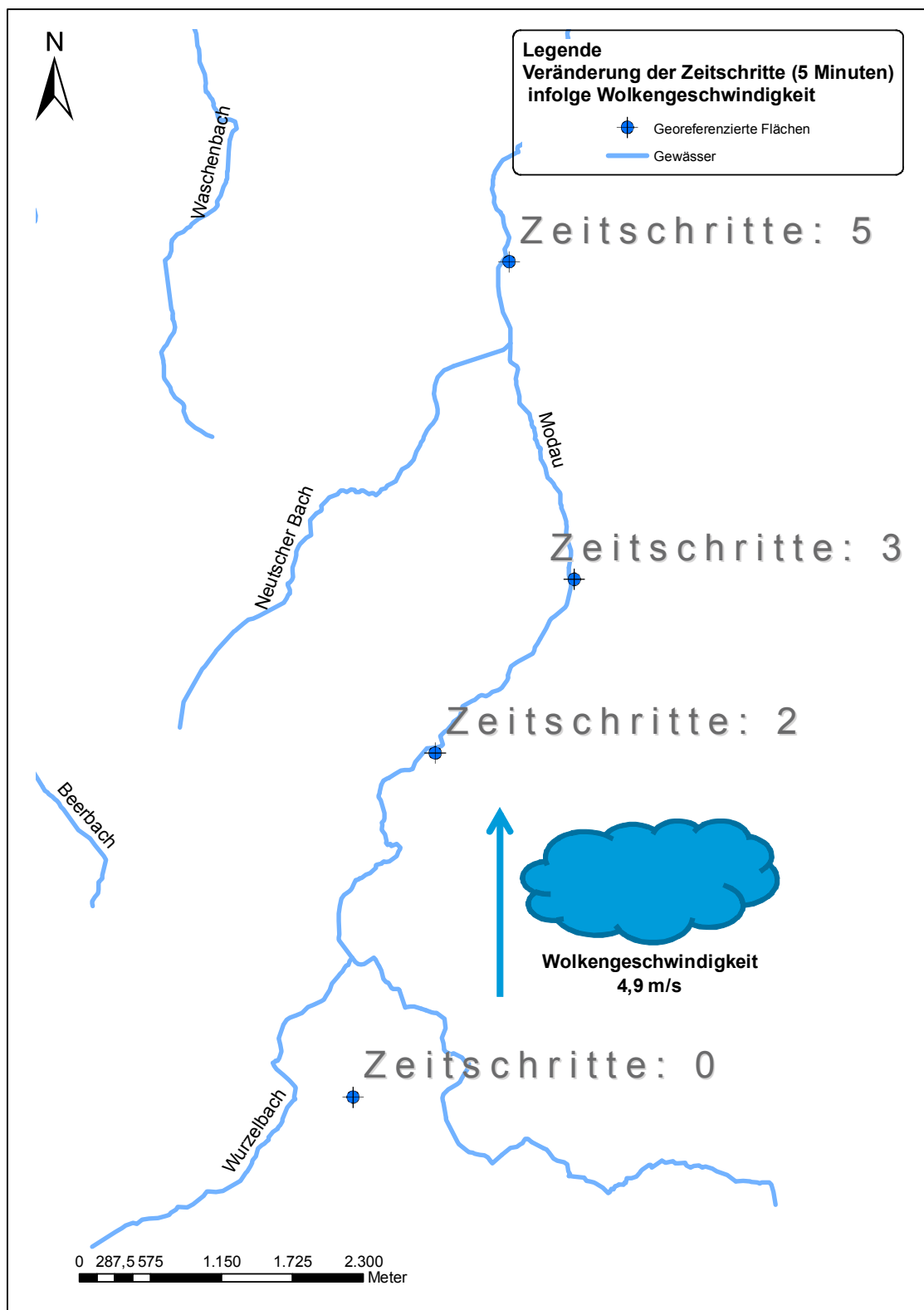


Abbildung 6.18 Zugrichtung des Niederschlags und resultierende Änderungen der Zeitschritte  
 (Süd nach Nord)

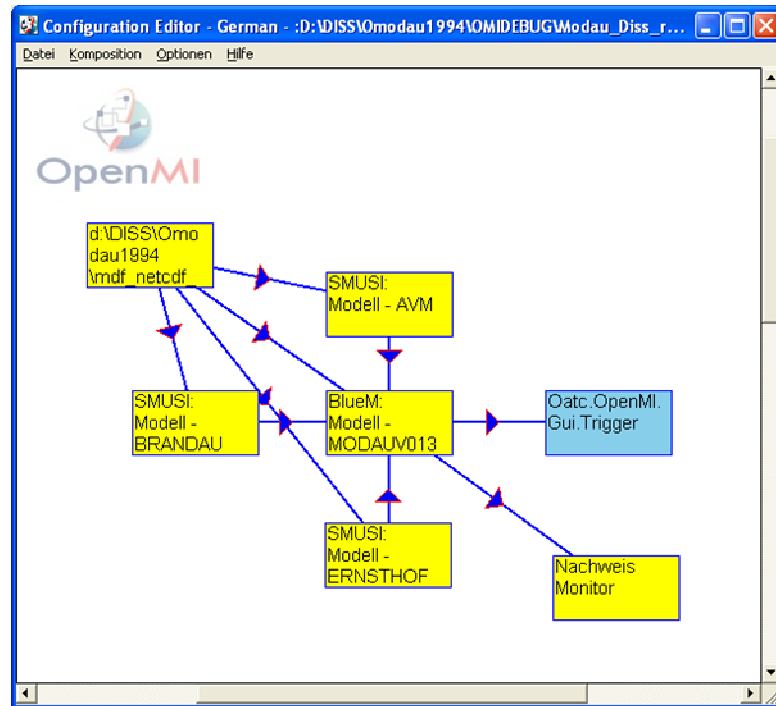


Abbildung 6.19 Integriertes Modell der oberen Modau in OpenMI

Jedes Szenario ist einzeln simuliert worden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulationen diskutiert. Die Grafiken der Ergebnissganglinien sind mit dem Visualisierungswerkzeug BlueM.Wave generiert worden.

In Abbildung 6.20 ist die Abflussganglinie des Gerinneabschnitts S34 gezeigt, welches das letzte modellierte Element ist und in der Nähe der Gemeinde Modau liegt. Über dem Abfluss ist der Belastungsniederschlag aufgetragen. Die Abflussganglinie zeigt den Abfluss, der sich aufgrund des Niederschlags bei dem Szenario Windstill einstellt. Die Maximalabflüsse infolge der Regenereignisse unterscheiden sich maßgeblich. Die absoluten Maxima werden bei den Dauerstufen 15 Minuten und 20 Minuten des ein-jährlichen Blockregens erreicht. Ab der Dauerstufe 90 Minuten (und länger) ist zu erkennen, dass die Regenereignisse zeitlich zu nah aneinander gereiht sind und sich in der Wirkung der Regenereignisse überlagern. Da die Maximalabflüsse aber sehr gering im Verhältnis zu der Dauerstufe 20 Minuten sind und dieses Beispiel reinen Demonstrationszwecken dient, wurde an dieser Stelle auf eine Anpassung verzichtet. Ähnlich verhält es sich mit dem Initialisierungsabfluss in dem Gewässer, der vor dem ersten Regenereignis bei etwa  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  liegt, wobei sich später für das unbelastete System ca.  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  einstellt. Auch hier werden die Ergebnisse bezüglich des Maximalereignisses der Dauerstufe 20 Minuten nicht beeinflusst. Das Szenario Windstill wird als Referenzzustand für die anderen Szenarien verwendet.

Abbildung 6.21 zeigt für den gleichen Gerinneabschnitt (S34) die Abflussganglinien aller vier Szenarien. Zur Orientierung ist der Niederschlag des Szenarios Windstill in der Grafik aufgetragen. Zu beobachten ist, dass wie beim Szenario Windstill bei allen drei anderen Szenarien die Maximalabflüsse infolge der 15 und 20 minütigen Dauerstufen des ein-jährlichen Blockregens erreicht werden. Abbildung 6.22 zeigt im Detail die Abflussganglinien infolge des 20 mi-

nütigen ein-jährlichen Blockregens für alle Szenarien. Zu erkennen ist, dass sich die Form der Abflussganglinien unterscheiden. Allerdings ist bei dem Scheitelpunkt der Abflüsse nur ein geringer Unterschied erkennbar.

Abbildung 6.23 zeigt diesen Unterschied im Vergleich des Szenarios Windstill und dem Szenario Süd-Nord. Zur Orientierung sind die Regenereignisse beider Szenarien in dem Diagramm mit angegeben (Niederschlag auf Fläche A38). Aufgrund der zeitlichen Verzögerung des Niederschlags im nördlichen Teil der Einzugsgebiete ist der ansteigende Ast der Abflusswelle bei dem Süd-Nord Szenario um 25 Minuten verschoben. Auch der Scheitelpunkt ist um ca. 25 Minuten verschoben. Allerdings wird durch die Überlagerung der Abflusswelle des südlichen mit dem nördlichen Teil der Einzugsgebiete ein minimal höherer Scheitel bei dem Süd-Nord Szenario erreicht.

Den Vergleich des Nord-Süd mit dem Windstill Szenario der Abflussganglinien des zweiten untersuchten Punkts (bei Gerinnestrecke S49 hinter der Kläranlageneinleitung bei Ernstthofen) zeigt Abbildung 6.24. Auch hier ist zu erkennen, dass die ansteigenden Äste der Abflüsse um 25 Minuten verschoben sind. Das Maximum des Windstill Szenarios ist an dieser Gerinnestrecke höher als das des Süd-Nord Szenarios.

Da das giM-System Ergebnissganglinien mit Georeferenzierung im netCDF Format erzeugen kann, ist die Darstellung der Ganglinien mithilfe von ArcView™ direkt möglich. So zeigt Abbildung 6.25 das Eigenschaftsfenster von ArcMap™ für eine angehängte netCDF Datei. Unter Nutzung des GIS ist die Kartendarstellung in Abbildung 6.26 erstellt worden. Hier sind die Maximalscheitelabflüsse aller vier Szenarien für die zwei Auswertungspunkte dargestellt. Ein interessanter Aspekt ist, dass a priori nicht abgeschätzt werden kann, wie die Wirkung der Niederschlagsverteilung auf die einzelnen Gerinnestrecken bezüglich des Abflusses ist. So führt das Süd-Nord Szenario für das Gerinneelement S34 zu dem größten Abfluss, wohingegen der Maximalabfluss des Süd-Nord Szenarios beim Element S49 unter dem des Windstill Szenarios liegt. Das Maximum am Punkt S49 wird beim Szenario Ost-West erreicht.

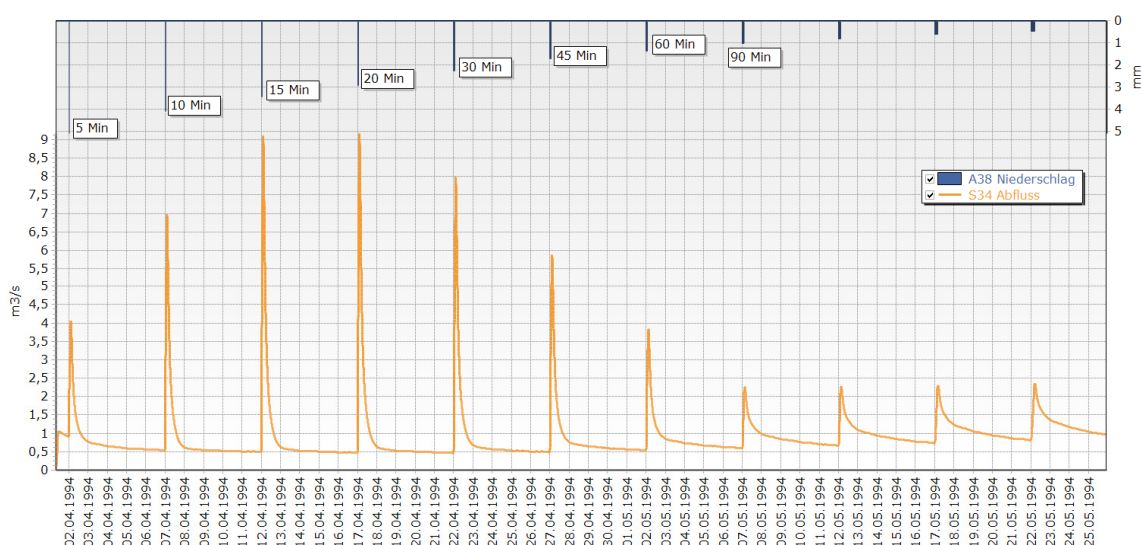


Abbildung 6.20 Ganglinie des letzten Gerinneabschnitts (S34) – Szenario Windstill

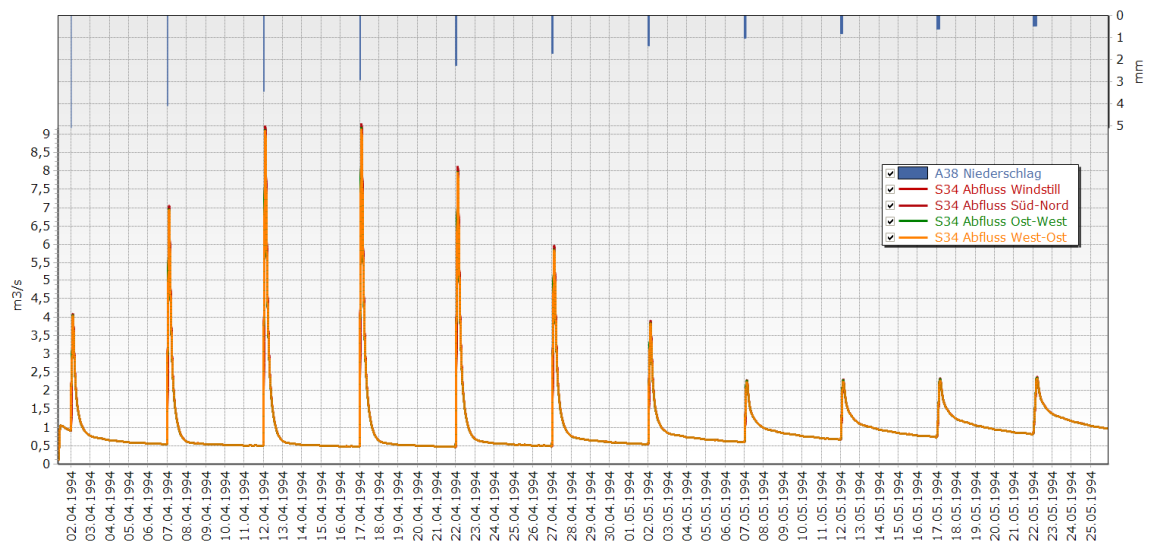


Abbildung 6.21 Ganglinie des letzten Gerinneabschnitts (S34) für alle vier Szenarien

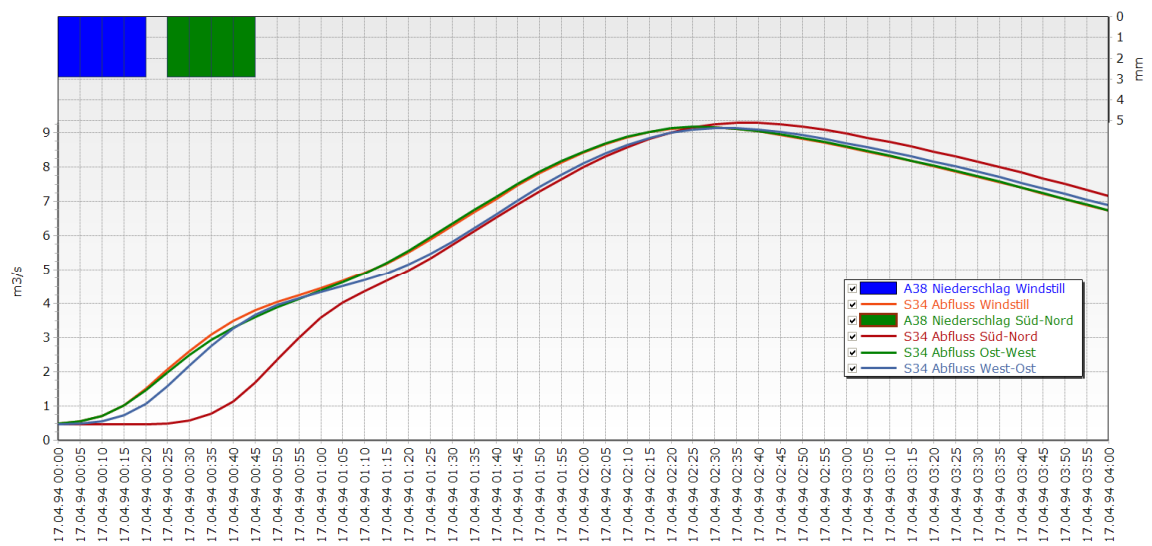


Abbildung 6.22 Detailansicht des maximalen Abflussereignisses (für S34) – alle Szenarien

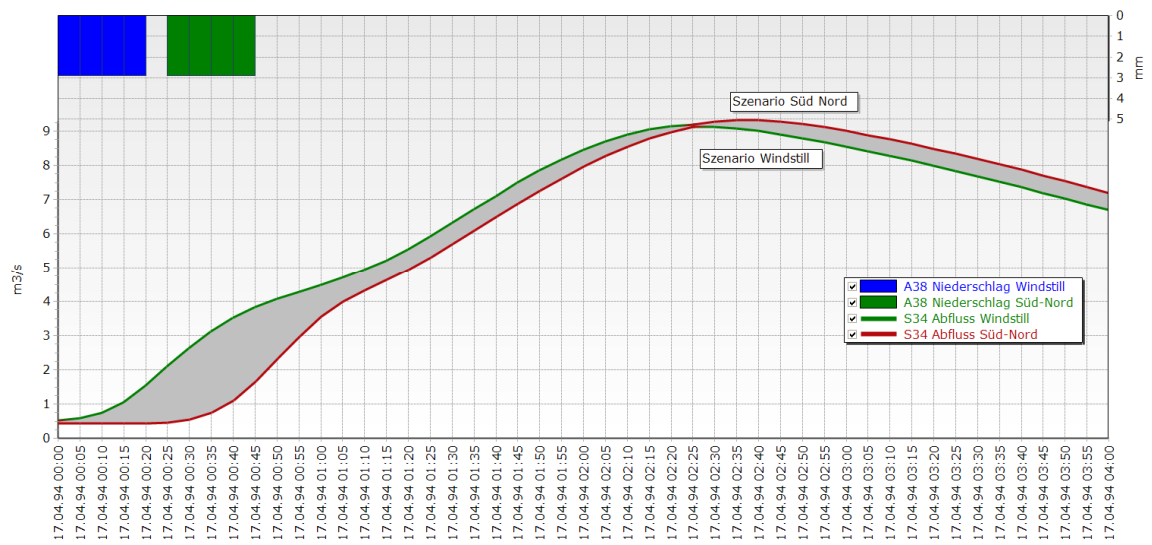


Abbildung 6.23 Detailansicht – Vergleich Szenario Windstill mit Süd Nord (für S34)

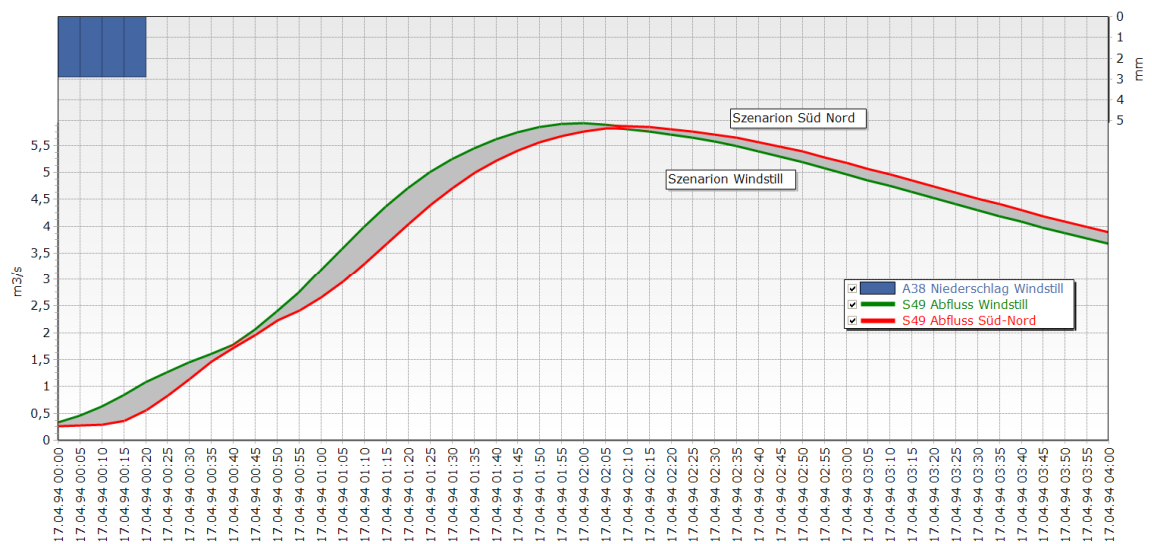


Abbildung 6.24 Detailansicht – Vergleich Szenario Windstill mit Süd Nord (für S49 hinter Kläranlage Ernsthofen)

Generell unterscheiden sich die Maxima der Abflüsse um etwa 1 %, was durchaus unterhalb der Modellunsicherheit liegen sollte. Insofern ist eine Aussagekraft der Ergebnisse dieser Fallstudie kritisch zu beurteilen. Auch ist der Auflösungsgrad der räumlich verteilten Elemente sehr grob (4 Punkte für 34 km<sup>2</sup>). Um ein aussagekräftigeres Fallbeispiel zu erzeugen, müsste diese Rasterung erheblich verfeinert werden. Außerdem könnten die Simulationszeitschritte von 5 Minuten auf eine Minute verkleinert werden, was auch eine detailliertere zeitliche Auflösung ermöglicht. Ferner könnten neben den vier Szenarios weitere Variationen untersucht werden. So ist zu erwarten, dass die Windgeschwindigkeit einen Einfluss besitzt, die in diesem Beispiel mit einer konstanten Durchschnittsgeschwindigkeit angesetzt wurde. Bezüglich der Windrichtung könnten die vom DWD veröffentlichten Verteilungsfunktionen berücksichtigt werden.

Allerdings ist das Ziel im Rahmen dieser Arbeit nicht die Beantwortung der Frage, inwiefern die Niederschlagsverteilung bei der immissionsorientierten Beurteilung berücksichtigt werden sollte, sondern die Demonstration des giM-System und mögliche Einsatzgebiete dieses Systems.

Ohne das neu aufgebaute giM-System wäre die Bearbeitung dieses Fallbeispiel sehr mühsam. Bei einem konventionellen Vorgehen würde sich der Aufwand, die Niederschlagseingangsdaten an die Teilmodelle zu koppeln mindestens verdoppeln, da jedes Teilmodell mit einem anderen Datenformat arbeitet. Wenn die Teilmodelle ein proprietäres Eingabeformat nutzen, würde der Aufwand sogar ein Vielfaches betragen. Hier konnte gezeigt werden, dass das neue Werkzeug der giM das Aufstellen, das Simulieren und das Auswerten entscheidend unterstützen kann. Auch werden die Ergebnisdaten bei dem giM-System standardisiert ausgegeben, so dass auch hier eine große Verbesserung gegenüber einem konventionellen Vorgehen liegt. Vorher konnte ein solches Fallbeispiel zwar bearbeitet werden, doch war der Aufwand enorm. Mit dem neuen System können integrierte Modelle sehr viel praktikabler bearbeitet werden.

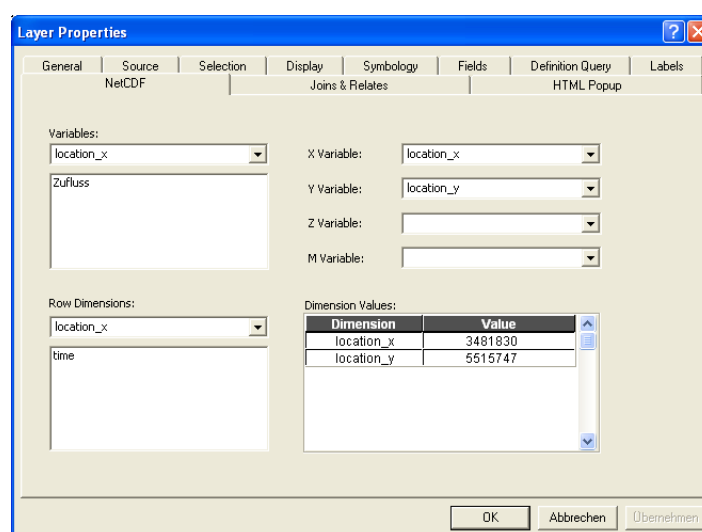


Abbildung 6.25 Eigenschaftenfenster von ArcView™ für netCDF-Datei

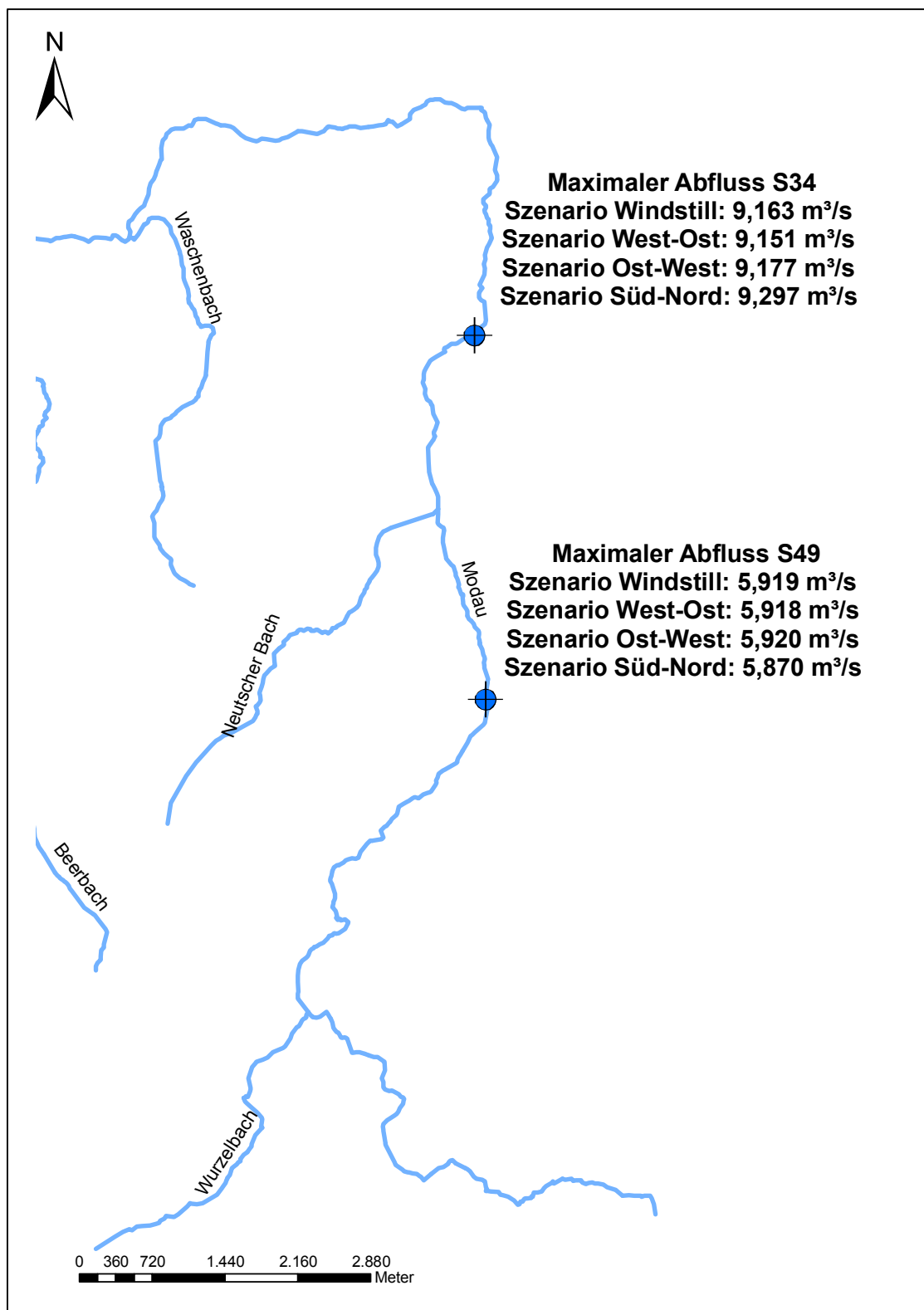


Abbildung 6.26 Kartendarstellung der Simulationsergebnisse (netCDF) mit ArcView™



---

### 6.4.3 Analyse der Ergebnisse

---

Die beiden Fallbeispiele haben gezeigt, dass das entwickelte giM-System einsatzfähig ist und bei der integrierten Modellierung ein wichtiges Werkzeug darstellt. Das aufgebaute giM-System besitzt zurzeit die Möglichkeit, Niederschlagsinformationen als Randbedingungen vorzugeben und Abflussinformationen in georeferenzierter Form auszugeben. Trotz dieser rudimentären Schnittstellen zwischen den Komponenten konnte aber der ganzheitliche Aspekt bezüglich der Datenbereitstellung über den Standard netCDF, der integrierten Simulation mittels OpenMI und der anschließenden Analyse von den im Standard netCDF ausgegebenen Ganglinien gezeigt werden.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil des giM-Systems ist die Austauschbarkeit von Modellkomponenten. Dafür müsste als nächster Schritt ein weiteres Fallbeispiel aufgebaut werden, anhand dessen eine Austauschbarkeit der Simulationskomponenten oder eine Verfeinerung des Detaillierungsgrads an ausgewählten Stellen demonstriert werden kann. So wäre ein Fallbeispiel dafür passend, welches die Auswirkungen von Einleitungen aus Kanalnetz und Kläranlage auf die Gewässergüte untersucht, bei dem zunächst die Kläranlage vereinfacht simuliert wird und dann mittels dynamischer Kläranlagenmodellierung ersetzt wird. Da der Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht ausreicht, alle Vorteile anhand von Beispielen zu demonstrieren, wurde auf weitere Fallbeispiele verzichtet.

---

## 7 Zusammenfassung, Bewertung und Ausblick

---

*„Wo damals die Grenzen der Wissenschaft waren, da ist jetzt die Mitte.“*

*(Georg Christoph Lichtenberg)*

Die Hypothese dieser Arbeit lautete: Es kann ein integriertes Modellsystem aufgebaut werden, das die Kopplung der Modelldomänen generisch abbildet, eine Daten-Modellkopplung implementiert und die Inter- bzw. Transdisziplinarität der integrierten Modellierung berücksichtigt!

In der Arbeit wurde ein integriertes Modellsystem aufgebaut, deren einzelnen Modelle mithilfe des Standards OpenMI gekoppelt werden. Für die Datenintegration wurde der Standard netCDF verwendet und gezeigt, dass mit bestehenden Komponenten (die *generic engine interface* und dem BlueM.Analyser) Daten an Modelle gekoppelt werden können und eine einheitliche standardisierte Datenausgabe für ein verteiltes Modellsystem erreicht werden kann. Durch die Verwendung des *Interfaced Model* Ansatzes kann die Interdisziplinarität berücksichtigt werden, da sich Fachingenieure und weitere Beteiligte in ihren gewohnten Arbeitsumgebungen bewegen können und sich nur an den Schnittstellen miteinander austauschen müssen. In Bezug auf die Transdisziplinarität konnte durch die standardisierte Ergebnisausgabe eine gute Basis zur Integration eines Entscheidungssystems (DSS) aufgebaut werden. Damit ist die Hypothese erfüllt, und es wurde ein neues Werkzeug zur ganzheitlichen integrierten Modellierung durch Kombination bestehender Standards entwickelt.

---

### 7.1 Bewertung

---

Die Fragestellungen aus Kapitel 1.3 werden in im Folgendem aufgegriffen, um das aufgebaute giM zu beurteilen.

#### **Generische Kopplung von Modelldomänen:**

*Gibt es Möglichkeiten, die Kopplung unterschiedlicher Modelldomänen generisch zu beschreiben? Existieren Standards oder Ontologien?*

Es existieren Standards zur Modellkopplung. Der Standard OpenMI wird genutzt. Wasserwirtschaftlich geprägte Ontologien gibt es, doch werden diese nicht benötigt, um eine generische Modellkopplung vorzunehmen.

#### **Daten-Modell-Kopplung:**

*Wie können Eingangsdaten mit den Modellsystemen gekoppelt werden? Können diese unabhängig von unterschiedlichen Modelldomänen gleichzeitig genutzt werden? Gibt es Standards der Datenhaltung, die für Eingabe und Auswertung genutzt werden können?*

Es existieren sowohl Datenhaltungsstandards als auch Datenkopplungsstandards mit deren Hilfe Daten an Modellsysteme gekoppelt werden können. Mit dem vorgestellten Entwurf können über die Nutzung von der *generic engine interface* (GEI) unterschiedliche Modelldomänen

---

gleichzeitig auf die Daten zugreifen. Als beispielhafte Standards sind im Entwurf *network common data format* (netCDF) und *sensor observation service* (SOS) enthalten.

#### **Einsatz als Inter- / Transdisziplinäres Modellsystem:**

*Inwieweit kann auf die Interdisziplinarität der integrierten Modellierung eingegangen werden? Können unterschiedliche Fachdisziplinen gemeinsam am Modell arbeiten?*

Durch den *Interfaced Model* Ansatz können Fachexperten mit denen von ihnen gewohnten Simulationsumgebungen modellieren, die dann im zweiten Schritt zu einem Gesamtmodell gekoppelt werden.

#### **Erweiterbar mit neuen Modelldomänen:**

*Können neue Modelldomänen in das Modellsystem integriert werden? Können Modellansätze durch andere ausgetauscht werden (z. B. hydrologische Kanalnetzmodellierung durch hydrodynamische Kanalnetzmodellierung)?*

Der Ansatz des *Interfaced Model* und die Nutzung von OpenMI ermöglichen den Austausch kompletter Modellsysteme und bieten zudem die Möglichkeit, neue Modelldomänen in bestehende Gesamtmodelle zu integrieren.

#### **Demonstration und Implementierung eines ganzheitlichen integrierten Modellsystems:**

*Lässt sich ein Gedankenmodell der ganzheitlichen integrierten Modellierung auch in ein implementiertes System überführen? Wird die Heterogenität der Modelldomänen berücksichtigt? Gehen durch die Abstraktion der giM die Detailprobleme verloren?*

Es wurde im Rahmen dieser Arbeit ein ganzheitliches integriertes Modellsystem entwickelt und anhand von zwei Fallbeispielen die Funktionalität und die Anwendung demonstriert. Die Ergebnisse dieser Studien zeigen, dass sich das Gedankenmodell eines ganzheitlichen integrierten Modells in ein real existierendes System überführen lässt.

---

## **7.2 Zusammenfassung**

---

Mit dieser Arbeit ist ein weiter Bogen gespannt worden, der von der Bedeutung der integrierten Modellierung über die Möglichkeiten der IT-Technologien bis hin zu einem ganzheitlichen integrierten Modellsystem anhand von Fallbeispielen gespannt wurde. Das Ziel der Arbeit bestand darin, die aktuelle integrierte Modellierung bezüglich ihrer Werkzeuge und ihrer Arbeitsschritte zu analysieren. Die Ergebnisse dieser Analyse fließen ein in einen Entwurf und die Entwicklung eines integrierten Modellsystems, welches ganzheitlich die Modellierung unterstützt.

Die Einleitung und das Grundlagenkapitel führen in die integrierte Modellierung urbaner Abwassersysteme ein. Dabei wurden die Themenfelder der Forschung und die zugehörigen prototypischen Modellsysteme vorgestellt. Ferner wurde darauf hingewiesen, dass es eine Diskrepanz zwischen den Bedürfnissen der praktischen Anwendung der integrierten Modellierung und den Systemen, die in der Forschung entwickelt wurden, gibt. Der viel zitierte Satz: „So einfach wie möglich, so detailliert wie nötig.“ beschreibt dieses Dilemma in kurzen Worten.

---

Da dieser gordische Knoten mit einer einzelnen Arbeit wahrscheinlich nicht gelöst werden kann, sucht diese Arbeit nicht eine Lösung der generellen Problematik der integrierten Modellierung, sondern einen Weg, eine deutliche Verbesserung der integrierten Modellierung zu erreichen, der diese Widersprüche mit berücksichtigt. Aus diesem Grund sind im Grundlagenkapitel die Methoden der Modellierung wasserwirtschaftlicher Systeme untersucht worden. Ein Schwerpunkt dieser Analyse sind die Fragen bezüglich der Interdisziplinarität und der Transdisziplinarität der integrierten Modellierung und mögliche Strukturen, diese zu berücksichtigen. Ein zweiter Schwerpunkt liegt in der Analyse der verwendeten IT-Infrastrukturen im wasserwirtschaftlichen Kontext. Diese Analyse mündet in Vorschläge für IT-Konzepte, welche die Modellierung unterstützen können. Dabei wurden die Methoden der Softwareentwicklungskonzepte wie z. B. die komponentenbasierte Softwareentwicklung vorgestellt. Zusätzlich wurde die Bedeutung von generischen Schnittstellen und Standards zur Datenhaltung in Bezug auf die wasserwirtschaftliche Modellierung hervorgehoben.

Eine deutliche Verbesserung der integrierten Modellierung ist durch die Zusammenführung von ingenieurwissenschaftlichen Verfahren und informationstechnologischen Werkzeugen zu erreichen. Es wurde analysiert, welche Verfahren zur Modellierung integraler Systeme angewendet werden können. Dabei wurden zwei Ansätze zur Modellkopplung beurteilt. Das *Supermodel* als vereintes Modell, welches neue Modelldomänen direkt in dem Modellsystem implementiert, und der *Interfaced Model* Ansatz, welcher einen verteilten Ansatz der Modellsysteme vorsieht. Die Modelle werden beim *Interfaced Model* Ansatz über Schnittstellen miteinander gekoppelt. Für das ganzheitliche integrierte Modellsystem wurde der *Interfaced Model* Ansatz gewählt, da er die größte Flexibilität und Erweiterbarkeit aufweist. Außerdem wurde die Bedeutung der Datenintegration an die Modellsysteme hervorgehoben und untersucht, welche Datenkategorien existieren und wie diese an Modelle gekoppelt werden können.

Der Kern dieser Arbeit ist der Entwurf eines ganzheitlichen integrierten Modellsystems. Dabei steht „integriert“ für die Modellkopplung verschiedener Modelldomänen und „ganzheitlich“ für die Unterstützung der Arbeitsprozesse der Modellierung und der Datenintegration. Die Zielsetzung des ganzheitlichen integrierten Modellsystems ist ein System, das die Modellkopplung generisch abbilden kann und die Datenintegration vereinfacht. Um ein nachhaltiges System aufzubauen, sind dabei bestehende Standards kombiniert worden.

Entwickelt wurde ein ganzheitliches integriertes Modellsystem, das zwei Teil-Modellsysteme beinhaltet. Als Kanalnetzmodell ist das Schmutzfrachtmodell SMUSI verwendet worden. Um das Gewässer abzubilden, wurde das hydrologische Gewässermodell mit Gewässergütemodellierung BlueM.Sim genutzt. Beide Modelle wurden um eine Georeferenzierung erweitert und besitzen nun Schnittstellen zur externen Eingabe von Niederschlagsdaten und Ausgabe von georeferenzierten Abflusswerten. Für die Kopplung von Niederschlagsdaten an die Modellsysteme ist die Komponente GEI der Bundesanstalt für Wasserbau verwendet worden, die erweitert wurde, so dass sie netCDF-Dateien mit Niederschlagsintensitäten einlesen kann und diese über OpenMI an die Modellsysteme zu jedem simulierten Zeitschritt übergeben kann. Für die Datenauswertung wurde das Auswertungswerkzeug BlueM.Analyser dahingehend erweitert, dass eine Ausgabe von Ganglinien in netCDF-Format mit Angabe der räumlichen Informationen möglich ist.

---

Das aufgebaute System wurde auf zwei Fallbeispiele angewendet. Das Ziel des fiktiven Fallbeispiels ist der Nachweis der grundsätzlichen Funktionalität des Systems. Das zweite, reale Fallbeispiel zeigt eine Anwendung des Systems und die Vereinfachungen der Modellierung für den Anwender. Das Beispiel untersucht die Auswirkung des Windes bzw. der Zugrichtung eines Regenbandes auf eine immissionsorientierte Beurteilung bezüglich der hydraulischen Belastung von Mischwasserentlastungsanlagen anhand deren Abflussspitzen im Gewässer. Dafür wurden vier Szenarien untersucht, die sich in der Windrichtung unterscheiden (Windstill, Wind von West nach Ost, Wind von Ost nach West und Wind von Süd nach Nord). Anhand der Diskussion und Auswertung der Ergebnisse der Simulationen werden die Vorteile des aufgebauten ganzheitlichen integrierten Modellsystems verdeutlicht.

---

### **7.3 Ausblick**

---

Diese Arbeit hat die Leistungsfähigkeit des erstellten ganzheitlichen integrierten Modellsystems aufgezeigt. Anhand eines realistischen Fallbeispiels wurde dargestellt, wie Niederschlagsdaten an unterschiedliche Modelle verteilt und wie Abflüsse in georeferenzierter Form mithilfe von geografischen Informationssystemen ausgewertet werden können. Eine wesentliche Erweiterung des Systems besteht darin, neue Quantitäten neben den Niederschlagsdaten und den Abfluss hinzuzufügen. So sind Initialisierungsdaten wie Bodenkennwerte durchaus reizvoll, wenn sie automatisiert in georeferenzierter Form an Modelle verteilt werden, um z. B. die Autokalibrierung integrierter Modelle zu vereinfachen. Auch könnten neben den Niederschlagsinformationen weitere Randbedingungsdaten wie die Gewässertemperatur angebunden werden. Nicht zuletzt könnte die Aussagekraft des vorgestellten Fallbeispiels dadurch erhöht werden, indem die Verteilung der Niederschlagsquantitäten mittels Regenradar bestimmt wird und direkt an die Modellsysteme gekoppelt wird.

Eine weitere Verbesserung des ganzheitlichen integrieren Modellsystems bezieht sich auf die Behandlung georeferenzierter Daten. Hier könnten zum einen die verwendeten Modellsysteme mit komplexeren Geometrien, wie Flächenbeschreibung mittels Polygonzüge oder Linien für Gerinnestrecken, erweitert werden. Zum anderen bietet das Feld der Interpolation und Transformation an den Schnittstellen der Modelle (bzw. Daten-Modellkopplung) viel Platz zur Erweiterung und zur Forschung. Auch bietet sich durch die Verwendung georeferenzierter Daten eine Anbindung an GIS an, um die in der Einleitung (Kapitel 1.3) beschriebene Praxis-tauglichkeit zu erreichen.

Nicht zuletzt steht mit dem entwickelten ganzheitlichen integrierten Modellsystem ein Werkzeug zur Verfügung, um neue Anwendungsgebiete für die integrierte Modellierung zu erschließen. So ist z. B. eine Umsetzung eines Echtzeitkontrollsystems in der integrierten Modellierung möglich, bei dem direkt auf die Daten der Messstellenlogger über den Standard netCDF zugegriffen werden kann.

---

## 8 Literaturverzeichnis

---

„Es erfordert außerordentlich viel Talent, einem vernünftigen Manne etwas Neues und Wichtiges so leicht vorzutragen, daß er sich freut, es jetzt zu wissen.“

(Georg Christoph Lichtenberg)

Abbott, Michael B; Refsgaard, Jens Christian (1996). *Distributed Hydrological Modelling*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London (Water Science and Technology Library). — ISBN: 0-7923-4042-6

Alex, Jens; Risholt, L. P; Schilling, Wolfgang (1999). Integrated Modeling System for Simulation and Optimization of Wastewater Systems. In: *Eighth International Conference on Urban Storm Drainage*. Sydney, Australien.

Alex, Jens; Schütze, Manfred (2009). Programmdokumentation: SWQM - Simple Water Quality Model, Lagrange-Ansatz. ifak Magdeburg e. V.

Alexander, Christopher; Ishikawa, Sara; Silverstein, Murray (1977). *Pattern Languages*. Oxford Univ. Press, New York.

Ames, D. P.; Horsburgh, J. S.; Goodall, J.; Tarboton, D. G.; Whiteaker, T.; Maidment, D. R. (2009). Introducing the open source CUAHSI Hydrologic Information System desktop application (HIS Desktop). In: *18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation*. S. 4353-4359.

Arnold, J. (1990). *SWRRB: A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management*. Texas A & M University Press, College Station.

ATV (1997). Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.2.3 Erstellung eines allgemein verfügbaren Gewässergütemodells. In: *Korrespondenz Abwasser*. (Heft 11/1997), S. 2058 ff.

ATV (1992). *Arbeitsblatt ATV-A 128. Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen*. Hennef: GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V.

ATV (1991). *Arbeitsblatt ATV-A 131, Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*. Deut-

---

sche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

ATV (1994). *ATV A 111: Richtlinien für die hydraulische Dimensionierung und den Leistungsnachweis von Regenwasserentlastungen in Abwasserkanälen und -leitungen*. St. Augustin: Abwassertechnische Vereinigung (ATV) e. V.

ATV (1999). *Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen*. Arbeitsblatt Abwassertechnische Vereinigung e. V.

ATV-DVWK (2001). *Merkblatt ATV-DVWK-M 177, Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen - Erläuterungen und Beispiele*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

Bach, Michael (2010). Integrierte Modellierung für Einzugsgebiete mit komplexer Nutzung. In Vorbereitung: TU Darmstadt.

Bach, Michael; Froehlich, Felix; Heusch, Steffen; Hübner, Christoph; Muschalla, Dirk; Reußner, Frank; Ostrowski, Manfred W (2009). BlueM - a free software package for integrated river basin management. In: Fohrer, Nicola; Schmalz, Britta; Hörmann, Georg; Bieger, Katrin (Hrsg.) *Hydrologische Systeme im Wandel, Beiträge zum Tag der Hydrologie 2009*. Theodor-Heuss-Allee 17, D-53773 Hennef: Fachgemeinschaft Hydrologisch Wissenschaften in der DWA S. 109-115. — ISBN: 978-3-941089-54-9

Beck, M. Bruce (1976). Dynamic Modelling And Control Applications In Water Quality Maintenance. In: *Water Resources*. 10 , S. 575-595.

Bente, Stefan; Zanke, U.; Ostrowski, Manfred W; Oberlack, M. (Hrsg.) (2001). *Eine Softwaregestützte Methodik zur Voreinschätzung der wasserwirtschaftlichen Auswirkungen von Maßnahmen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung*. Darmstadt: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt (Mitteilungen).

Beran, B.; Cox, S. J. D.; Valentine, D.; Zaslavsky, I.; McGee, J. (2009). Web Services Solutions for Hydrologic Data Access and Cross-Domain Interoperability. In: *International Journal on Advances in Intelligent Systems Volume 2, Numbers 2&3, 2009*.

Bertrand-Krajewski, J. L.; Barraud, S.; Chocat, B. (2000). Need for improved methodologies and measurements for sustainable management of urban water systems. In: *Environmental Impact Assessment Review*. 20 (3), S. 323-331.

Blair, G. W.S; Crowther, E. M. (1929). The flow of clay pastes through narrow tubes. In: *The Journal of Physical Chemistry*. 33 (3), S. 321–330.



---

Blind, M.; Gregersen, J. B (2005). Towards an Open Modelling Interface (OpenMI) the HarmonIT project. In: *Advances in Geosciences*. 4 , S. 69-74.

Botts, M.; Percivall, G.; Reed, C.; Davidson, J. (2008). OGC® sensor web enablement: Overview and high level architecture. In: *GeoSensor Networks*. S. 175-190.

Bowie, GL.; Mills, WB.; Porcella, DB.; Campell, CL; Pagenkopf, JR; Rupp, GL; Johnson, KM; Chan, PWH; Gherini, SA; Chamberlin, CE (1985). *Rates, constants, and kinetic formulations in surface water quality modeling* , US Environmental Protection Agency. Athens Georgia: U.S. Environmental Protection Agency.

Brehmer, I.; Reußner, F.; Schütze, M.; Muschalla, D.; Ostrowski, M. (2009). Weiterentwicklung des hessischen "Leitfadens zum Erkennen ökologisch kritischer Gewässerbelastungen durch Abwassereinleitungen". Entwicklung einer simulationsgestützten Analyse- und Planungsmethodik. In: *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*. 2 (4), S. 215-217.

BSI (2010). What is a standard? *British Standard Institute*. Abgerufen am 17.11.2010 von <http://www.bsigroup.com/en/Standards-and-Publications/About-standards/What-is-a-standard/>.

Bund (1991). ISYBAU-orientiertes Handlungskonzept. Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau und dem Bundesministerium der Verteidigung herausgegeben.

Butler, David; Schütze, Manfred (2005). Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater systems. In: *Environmental Modelling & Software*. 20 (4), S. 415-426.

BWK (2008). *Detaillierte Nachweisführung immissionsorientierter Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen gemäß BWK-Merkblatt 3*. Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e. V.

Chapra, S.; Pelletier, G.; Tao, H. (2005). *QUAL2K: Documentation*. US EPA.

Churchill, M. A.; Elmore, H. L.; Buckingham, R. A. (1962). The prediction of stream reaeration rates. In: *J. San. Eng. Div. ASCE*.

Cohen, Shirley; Hurley, Patrick; Schulz, Karl W.; Barth, William L.; Benton, Brad (2006). Scientific formats for object-relational database systems: a study of suitability and perfor-



---

mance. In: *SIGMOD Rec.* 35 (2), S. 10-15, doi: 10.1145/1147376.1147378.

Colomb, R. M. (1997). Impact of semantic heterogeneity on federating databases. In: *The Computer Journal.* 40 (5), S. 235.

Commerell, W. (1999). VHDL-AMS-a normed Modeling Language for multi-domain Systems. In: *Simulation News Europe.* 27 , S. 4–7.

Crispin, L.; Rosenthal, K. S (2002). *Testing extreme programming.* Pearson Education. — ISBN: 0321113551

Crooks, S. M; Naden, P. S (2007). CLASSIC: a semi-distributed rainfall-runoff modelling system. In: *Hydrology and Earth System Sciences.* 11 (1), S. 516-531.

Crout, N. M. J.; Tarsitano, D.; Wood, A. T. (2009). Is my model too complex? Evaluating model formulation using model reduction. In: *Environmental Modelling & Software.* 24 (1), S. 1–7.

Denbo, D. W (2001). ncBrowse: A graphical netCDF file browser. In: *17th Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, AMS.* S. 14–19.

Devesa, F.; Comas, J.; Turon, C.; Freixó, A.; Carrasco, F.; Poch, M. (2009). Scenario analysis for the role of sanitation infrastructures in integrated urban wastewater management. In: *Environ. Model. Softw.* 24 (3), S. 371-380.

Dirksen, P. W; Blind, M. W; Bomhof, T.; Nagandla, S. (2005). Proof of Concept of OpenMI for Visual DSS Development. In: *Proceedings of the MODSIM 2005 conference, Melbourne, Australia.*

Dogan, Onur (2010). Coupling of porous media flow with pipe flow. Stuttgart: Fakultät II Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Universität Stuttgart.

Domenico, B.; Nativi, S.; Caron, J.; Bigagli, L.; Davis, E.; Ciardi, P. (2006). A standards-based, web services gateway to netCDF datasets. In: *22nd International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Atlanta, Georgia, Am. Meteor. Soc. Citeseer.*

Donchyts, Gennadii; Jagers, Bert (2010). DeltaShell-an open modelling environment. In: *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2010 International Con-*

---

*gress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada.*

DVWK (1999). *Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen*. Bonn, Germany: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser (DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft).

EC, W. F. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. In: *Official Journal of the European Communities*. 22 (12), S. 2000.

EPA (1995). *Combined Sewer Overflows: Guidance for Long-term Control Plan*. US Environmental Protection Agency, Office of Wastewater Management.

Erbe, V.; Frehmann, T.; Geiger, W. F.; Krebs, P.; Londong, J.; Rosenwinkel, K. H; Seggelke, K. (2002). Integrated modelling as an analytical and optimisation tool for urban watershed management. In: *Water science and technology*. S. 141–150.

Fitch, P.; Bai, Q. (2009). A standards based web service interface for hydrological models. In: *18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009*.

Fowler, Martin (2002). *Patterns of enterprise application architecture*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA. — ISBN: 0-321-12742-0

FWR (1994). *Urban Pollution Management Manual*. Marlow, UK: Foundation for Water Research.

FWR (1998). *Urban Pollution Management Manual 2nd Edition*. Marlow, UK: Foundation for Water Research.

Gamma, E.; Helm, R.; Johnson, R.; Vlissides, J. (1995). *Design patterns: elements of reusable object-oriented software*. Addison-wesley Reading, MA.

Gijsbers, P. J. A.; Moore, R. V.; Tindall, C. I. (2002). HarmonIT: Towards OMI, an Open Modelling Interface and Environment to harmonise European developments in water related simulation software. In: *Hydro-informatics 2002 conference*.

Goodall, J. L.; Horsburgh, J. S.; Whiteaker, T. L.; Maidment, D. R.; Zaslavsky, I. (2008). A first approach to web services for the National Water Information System. In: *Environmental Modelling & Software*. 23 (4), S. 404-411.

---

Grau, P.; Copp, J.; Vanrolleghem, P.; Takacs, I.; Ayesa, E. (2009). A comparative analysis of different approaches for integrated WWTP modelling. In: *Water Science & Technology*. 59 (1), S. 141–147.

Gregersen, J. B.; Gijsbers, P. J. A.; Westen, S. J. P. (2007). OpenMI: Open modelling interface. In: *Journal of hydroinformatics(Print)*. 9 (3), S. 175-191.

Guarino, N. (1998). Formal ontology in information systems. In: *Proceedings of FOIS'98, 6-8 June 1998*. Trento, Italy: IOS Press S. 3-15.

Gujer, Willi (2006). *Siedlungswasserwirtschaft*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. — ISBN: 3-540-34329-6

Heineman, G. T; Councill, W. T (2001). *Component-based software engineering: putting the pieces together*. Addison-Wesley USA.

Henson, C. A.; Pschorr, J. K.; Sheth, A. P.; Thirunarayan, K. (2009). SemSOS: Semantic sensor observation service. In: *Proceedings of the 2009 International Symposium on Collaborative Technologies and Systems (CTS 2009), Baltimore, USA, May 18-22 2009*.

Henze, M. (2000). *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. IWA Publishing (Scientific and Technical Report No. 9). — ISBN: 1 9002222 24 8

HMULV (2004). *Leitfaden für das Erkennen ökologisch kritischer Gewässerbelastungen durch Abwassereinleitungen in Hessen*. Begleitband Wiesbaden, Germany: Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz.

Holzworth, D. P; Huth, N. I; de Voil, P. G (2010). Simplifying environmental model reuse. In: *Environmental Modelling & Software*. 25 (2), S. 269–275.

Horrocks, I.; Patel-Schneider, P. F; Van Harmelen, F. (2003). From SHIQ and RDF to OWL: The making of a web ontology language. In: *Web semantics: science, services and agents on the World Wide Web*. 1 (1), S. 7–26.

Horsburgh, J. S.; Tarboton, D. G.; Piasecki, M.; Maidment, D. R.; Zaslavsky, I.; Valentine, D.; Whitenack, T. (2009). An integrated system for publishing environmental observations data. In: *Environmental Modelling and Software*. 24 (8), S. 879-888.

HSGSim (2008). *Leitfaden zur Integrierte Modellierung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer*. <http://www.hsgsim.org>: Hochschulgruppe Simulation.

---

ihwb (2000). *TALSIM, Flussgebietsmodellierung und -bewirtschaftung, Theoretische Grundlagen, Teil 1: Simulationsmodell*. Fachgebiet für Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung, TU Darmstadt.

itwh (2010). Institut für technische-wissenschaftliche Hydrologie - Computer in der Stadtentwässerung - Programmpakete. *Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie*. Abgerufen am 15.10.2010 von [http://www.itwh.de/S\\_Pakete.htm](http://www.itwh.de/S_Pakete.htm).

Jagers, Bert (2010). Linking Data, Models and Tools: An Overview. In: Swayne, D. A.; Yang, W.; Voinov, A. A.; Rizzoli, A.; Filatova, T. (Hrsg.) *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada*.

Jolma, A.; Kokkonen, T.; Koivusalo, H.; Laine, H. (2005). Architecture of an information system in model-based environmental problem solving. In: *ModSIM 05*.

Kamp, R. G.; Savenije, H. H. G. (2007). Hydrological model coupling with ANNs. In: *Hydrology and Earth System Sciences*. 11 (6), S. 1869–1881.

Kessler, H.; Giles, J.; Gunnink, J.; Hughes, A.; Moore, R. V.; Peach, D. (2009). Integrated modelling of natural and human systems—problems and initiatives. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. S. 1057.

Knapen, M. J. R.; Verweij, P.; Wien, J. E.; Hummel, S. (2009). OpenMI—The universal glue for integrated modelling? In: *18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009*. Cairns, Australia.

Knapen, Rob; Verweij, Peter; Janssen, Sander (2010). Agilists and the Art of Integrated Assessment Tool Development. In: Swayne, D. A.; Yang, W.; Voinov, A. A.; Rizzoli, A.; Filatova, T. (Hrsg.) *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada*.

Krafzig, D.; Banke, K.; Slama, D. (2004). *Enterprise SOA: Service-Oriented Architecture Best Practices (The Coad Series)*. Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ, USA.

Lawrence Livermore National Laboratory (2010). CF Metadata — CF Metadata. Abgerufen am 25.06.2010 von <http://cf-pcmdi.llnl.gov/>.

---

Liebiga, S.; Helduserb, S.; Stüwingb, M.; Dronkaa, S. (2001). Die Modellierung und Simulation gekoppelter mechanischer und hydraulischer Systeme. In: *ASIM Workshop*.

Lijklema, L.; Aalderink, R. H.; de Ruiter, H. (1996). Procesbeschrijvingen DUFLOW Zuurstofhuishouding in stromende en stagnante Watersystemen. In: *Landbouwniversiteit Wageningen, June*.

Liu, Y.; Gupta, H.; Springer, E.; Wagener, T. (2008). Linking science with environmental decision making: Experiences from an integrated modeling approach to supporting sustainable water resources management. In: *Environmental Modelling & Software*. 23 (7), S. 846-858.

Maidment, D. R. (2008). CUAHSI hydrologic information system: overview of version 1.1. In: *CUAHSI, Austin, Texas*.

Marx, Andreas (2007). *Einsatz gekoppelter Modelle und Wetterradar zur Abschätzung von Niederschlagsintensitäten und zur Abflussvorhersage Use of coupled model systems and weather radar to estimate precipitation fields and to enable flood forecasts*. Universität Stuttgart (Mitteilungen / Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 160). — ISBN: 3-933761-64-6

Maßmann, Stefanie; Jakobs, Frauke; Sellerhoff, Frank; Feldmann, Jan; Sieker, Heiko; Lange, Carsten; Om, Yunchol; Hinkelmann, Reinhard (2010). Hyd<sup>3</sup>Flow - Integrierte hydrologische und hydro-numerische Modellsysteme für eine verbesserte Hochwasservorhersage. In: *Nachhaltige Wasserwirtschaft durch Integration von Hydrologie, Hydraulik, Gewässerschutz und Ökonomie*. Braunschweig S. 123 ff.

Metcalf, Eddy (1971). *Storm Water Management Model*. [Environmental Protection Agency, Water Quality Office] for sale by the Supt. of Docs., US Govt. Print. Off.

Moore, R.; Tindall, I.; Fortune, D. (2004). Update on the HarmonIT project-The OpenMI Standard for model linking. In: *Proc. Hydroinformatics, Singapore*. 2 , S. 1811–1818.

Muschalla, D. (2006). Evolutionäre multikriterielle Optimierung komplexer wasserwirtschaftlicher Systeme. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt.

Muschalla, D.; Ostrowski, M.; Reußner, F.; Schneider, S. (2007). *Dokumentation des Schmutzfrachtmodells SMUSI Version 5.0*. Darmstadt, Germany: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Technische Universität Darmstadt.

---

Muschalla, Dirk; Alex, Jens (2010). La pipe - A Lagrange-based quality and transport mode. In: *Workshop of Central European Simulation Group (HSG); Lungern; 25.-27.11.2010*. Lungern, Schweiz.

MWH (2010). MWH Soft Website. Abgerufen am 15.10.2010 von <http://www.mwhsoft.com/products/>.

Notay, Kunwar Vikramjeet; Li, Chi-Yu; Simons, Franz (2010). *Model Coupling by Use of Autonomous Tensor Objects*. Aachen: Shaker (Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Berlin).

Novotny, V.; Witte, J. W. (1997). Ascertaining aquatic ecological risks of urban stormwater discharges. In: *Water Research*. 31 (10), S. 2573-2585.

OAR (1997). OpenMP Fortran Application Program Interface. OpenMP Architecture Review Board (<http://www.openmp.org>).

Ostrowski, M. (1992). Ein universeller Baustein zur Simulation hydrologischer Prozesse. In: *Wasser & Boden*. 11 (1992), S. 755-760.

Ostrowski, M. (2008). *Integrierte transdisziplinäre Modellierung als Grundlage des Wasserqualitätsmanagements*. Institutseigenes Dokument Fachgebiet für Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung, TU Darmstadt.

Ostrowski, M. (2001). The problem of coupling models for integrated river basin management. EGS General Assembly; HSB 2.01. Nizza.

Ostrowski, M.; Winterscheid, A.; Slikker, J.; Fuchs, E.; Huesing, V. (2003). The Nature Oriented Flood Damage Prevention (NOFDP) Project. In: *International conference 'Towards natural flood reduction strategies', Warsaw, 6-13 September 2003*.

Ostrowski, M. W. (1991). The management of urban catchments, New Technologies in Urban Drainage. Elsevier Applied Science.

Ostrowski, M. W.; Alsenz, L. (1990). Combined long-term simulation of runoff from urban and rural areas. In: *Water Science & Technology*. 1990..

Peters, Christian (2007). *Potenziale von Regenwasserversickerung, Speicherung, Urinseparation und Pumpwerkssteuerung für den Gewässerschutz - Dynamische Langzeitsimulation von Kanalnetz und Kläranlage und multikriterielle Ergebnisanalyse*. Institut für Technischen

---

Umweltschutz, TU Berlin (ITU-Schriftenreihe Band 02, 2007). — ISBN: 3-89720-843-1

Piasecki, M.; Bermudez, L. (2003). HYDROML: Conceptual development of a hydrologic markup language. In: *IAHR Congress, Thessaloniki, Greece*.

Piasecki, Michael; Ames, Dan; Goodall, Jon; Hooper, Rick; Horsburgh, Jeff; Maidment, David; Tarboton, David; Zaslavsky, Ilya (2010). Development of an Information System for the Hydrologic community. In: *9th International Conference on Hydroinformatics HIC 2010*. Tianjin, CHINA.

Rahman, J. M.; Perraud, J. M.; Seaton, S. P.; Hotham, H.; Murray, N.; Leighton, B.; Freebairn, A.; Davis, G.; Bridgart, R. (2005). Evolution of TIME. In: *MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*. S. 697-703.

Rahman, J. M.; Seaton, S. P.; Perraud, J. M.; Hotham, H.; Verrelli, D. I.; Coleman, J. R. (2003). It's TIME for a new environmental modelling framework. In: *Proceedings of MODSIM*. S. 1727-1732.

Rauch, W.; Bertrand-Krajewski, J. L.; Krebs, P.; Mark, O.; Schilling, W.; Schütze, M.; Vanrolleghem, P. A. (2002). Deterministic modelling of integrated urban drainage systems. In: *Water science and technology*. S. 81-94.

Rauch, W.; Harremoës, P. (1999). Genetic algorithms in real time control applied to minimize transient pollution from urban wastewater systems. In: *Water Research*. 33 (5), S. 1265-1277.

Rauch, W.; Harremoës, P. (1996). The importance of the treatment plant performance during rain to acute water pollution. In: *Water Science and Technology*. 34 (3), S. 1-8.

Refsgaard, J.; Storm, B. (1995). MIKE SHE. In: Singh, V. (Hrsg.) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications S. 809-846.

Reußner, F.; Alex, J.; Bach, M.; Schütze, M.; Muschalla, D. (2009). Basin Wide Integrated Modelling via OpenMI Considering Multiple Urban Areas. In: *Water Science & Technology*. 60 (5), S. 1241-1248, doi: 10.2166/wst.2009.471.

Reußner, F.; Heusch, S. (2008). Integrierte Modellierung heterogener Modellsysteme basierend auf dem Open Modelling Interface (OpenMI). In: R. Windisch; G. Faschingbauer; P. Katranuschkov (Hrsg.) *Forum Bauinformatik 2008 Tagungsband*. Dresden, Germany: Institut für Bauinformatik, Technische Universität Dresden S. 139-146. — ISBN: 978-3-86780-090-7



---

Reußner, F.; Schütze, M.; Muschalla, D. (2009). OpenMI compliant on-the-fly result analyser for integrated modelling. In: *8th International Conference on Urban Drainage Modelling*. Tokyo, Japan.

Rew, R.; Davis, G. (1990). Data Management: NetCDF: an Interface for Scientific Data Access. In: *IEEE Computer Graphics and Applications*. S. 76–82.

Rew, R.; Davis, G.; Emmerson, S.; Davies, H. (1997). NetCDF user's guide for C. In: *Unidata Program Center, June*.

Rew, R. K.; Davis, G. P. (1990). The unidata netCDF: software for scientific data access. In: *Sixth International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, February 7-8, 1990, Anaheim, Calif.* The Society S. 33.

Rizzoli, A. E; Donatelli, M.; Athanasiadis, I.; Villa, F.; Muetzelfeldt, R.; Huber, D. (2005). Semantic links in integrated modelling frameworks. In: *Mathematics and Computers in Simulation*.

Ruf, D. H. W.; Foglia, L.; Perona, P.; Molnar, P.; Burlando, P. (2006). Kopplung eines hydrodynamischen Strömungsmodells und eines Grundwassersmodells. In: *Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen*. Wasserbaukolloquium 2006: Strömungssimulationen im Wasserbau .

Salvucci, D. D (2001). Predicting the effects of in-car interface use on driver performance: An integrated model approach. In: *International Journal of Human-Computer Studies*. 55 (1), S. 85–107.

Schade, Peter; Lang, G; Jürges, J (2008). OpenMI Compliant Import of Initial and Boundary Data into a Numerical 3D Model. In: Sánchez-Marré, M.; Béjar, J.; Comas, J.; Rizzoli, A.; Guariso, G. (Hrsg.) *iEMSs 2008: International Congress on Environmental Modelling and Software Integrating Sciences and Information Technology for Environmental Assessment and Decision Making*. Manno.

Schindler, N.; Tränckner, J.; Krebs, P. (2010). Extreme value statistics for river quality simulations. In: *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 61 (2), S. 397.

Schütze, M. R; Beck, M. B; Butler, D. (2002). *Modelling, Simulation and Control of Urban Wastewater Systems*. UK: Springer-Verlag London. — ISBN: 1-85233-553-X



---

Shanahan, P.; Borchardt, D.; Henze, M.; Rauch, W.; Reichert, P.; Somlyódy, L.; Vanrolleghem, P. (2001). River Water Quality Model no. 1 (RWQM1): I. Modelling approach. In: *Water Science and Technology*. 43 (5), S. 1-9.

Simulink (1994). *Users Manual*. The MathWorks Inc.

Solvi, A. M (2006). Modelling the sewer-treatment-urban river system in view of the EU Water Framework Directive. PhD Thesis Belgium: Ghent University.

Sonnenberg, H. (2009). *Applicability of OpenMI and API for coupling models within MIA-CSO Project acronym: SAM-CSO*. Project Report, Berlin Centre of Competence for Water, Berlin, Germany.

Stephenson, A. (1999). Mars Climate Orbiter: Mishap Investigation Board Report. In: *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*. Phase I Report .

Streeter, H. W.; Phelps, E. B. (1925). *A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River*. Washington D.C.: United States Public Health Service (Public Health Bulletin).

Stroustrup, B. (1986). An overview of C++. In: *Proceedings of the 1986 SIGPLAN workshop on Object-oriented programming*. ACM S. 7-18.

Treinisch, L. A.; Gough, M. L. (1987). A software package for the data-independent management of multi-dimensional data. National Space Science Data Center, Greenbelt, MD, 9 pp. 1987b: A software package for the data-independent management of multi--dimensional data. In: *EOS*. 68 , S. 633-635.

USA (1977). Federal Water Pollution Control Act. Developments in the federal water pollution control program during 1977.

Valentine, D.; Zaslavsky, I.; Whitenack, T.; Maidment, D. (2007). Design and implementation of CUAHSI WaterML and WaterOneFlow Web Services. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. S. 08.

Vanrolleghem, P. A; Benedetti, L.; Meirlaen, J. (2005a). Modelling and real-time control of the integrated urban wastewater system. In: *Environmental Modelling and Software*. 20 (4), S. 427-442.

Vanrolleghem, P. A; Rosen, C.; Zaher, U.; Copp, J.; Benedetti, L.; Ayesa, E.; Jeppsson, U. (2005b). Continuity-based interfacing of models for wastewater systems described by Peter-

---

sen matrices. In: *Water Science and Technology*. 52 (1/2), S. 493-500.

Verweij, P.; Knapen, M. J. R.; de Winter, W. P.; Wien, J. J. F.; te Roller, J. A.; Sieber, S.; Jansen, J. M. L. (2010). An IT perspective on integrated environmental modelling: The SIAT case. In: *Ecological Modelling*.

Verworn, H. R; Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlichen Wasserbau -IWW-, Univ. Hannover (Hrsg.) (1999). *Die Anwendung von Kanalnetzmodellen in der Stadthydrologie*. Hannover: SuG-Verlagsgesellschaft (Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Heft 18).

Volcke, E. I. P; van Loosdrecht, M. C. M; Vanrolleghem, P. A (2006). Continuity-based model interfacing for plant-wide simulation: A general approach. In: *Water Research*. 40 (15), S. 2817-2828.

Wittenberg, D.; Sieker, F. (Hrsg.) (1992). *Urbane Gewässer-das Immissionsprinzip als Planungsansatz für die Stadtentwässerung*. Hannover: SuG-Verlagsgesellschaft (Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, heft 5).

Zender, Charles S. (2008). Analysis of self-describing gridded geoscience data with netCDF Operators (NCO). In: *Environmental Modelling & Software*. 23 (10-11), S. 1338-1342, doi: 10.1016/j.envsoft.2008.03.004.

Zuse, Konrad (1936). Verfahren zur selbsttätigen Durchführung von Rechnungen mit Hilfe von Rechenmaschinen. Konrad Zuse Internet Archiv, Zuse Institute Berlin, <http://www.zib.de/zuse>, ZIANr 0230, ZuP 005/014.

---

## 9 Anhang

---

*„Das Prinzip aller Dinge ist das Wasser,  
denn Wasser ist alles und ins Wasser kehrt alles zurück.“  
(Thales von Milet)*

---

### 9.1 Anpassungen der generic engine interface (GEI)

---

Folgende Dateien wurden für die Erweiterung um Niederschlagsinformationen in GEI erweitert:

phyvgl.cfg.dat (siehe Abbildung 9.1)

phydef.cfg.si.dat (siehe Abbildung 9.2)

phydef.cfg.rest.dat (siehe Abbildung 9.3)

phydef.cfg.de.dat (analog zu phydef.cfg.si.dat)

phydef.cfg.en.dat (analog zu phydef.cfg.si.dat)

```

# SCCS-IDs : @(#) 10/22/09 1.38 phyvgl.cfg.dat
# phyvgl.cfg.dat -----
# -----
# Konfigurationsdatei fuer automatische Differenzen-Ermittlung -----
#
# Hinweis: je umzuwandelnder phys. Groesse sin 2 Datenzeilen anzugeben
#         Zeile 1: Relationen zwischen Ein- und Ausgangsgroesse
#         Zeile 2: Umwandlungsvorschriften
# -----

(...)

# -----
# Angaben zu synoptischen Groessen -----
# -----
# ----- 1 -- 2 -- 3 -- 4 -- 5 -- 6 -- 7 -- 8 -- 9 --10 -----
# --AB--BC--CD--DE--EF--FG--GH--HI--IJ--JK--KL--L <KOMMENTAR --->
  1      0                                     spez. Durchfl.
      NONE
  2      1 1436                               Stroemung
      DIFB
  3      2 110  918                           Wasserstand
      DIFF DIFS
  4      0                                     Stroemungs-Ri.
      NONE
  5      1 1442                               Salzgehalt
      DIFF
  6      0                                     Temperatur
      NONE
  7      1 1469                               Schwebstoffgehalt
      DIFF
 10      1  951                               Druck
      DIF1
 11      0                                     Luftdruck
      NONE
 16      0                                     GesamtWasserTiefe
      NONE
 17      0                                     Topographie
      NONE
109      0                                     skal. Windgeschw.
      NONE
111      0                                     skal. Windricht.
      NONE
113      0                                     Dichte
      NONE
1641     0                                     Niederschlag
      NONE

```

Abbildung 9.1 Angepasste Konfigurationsdatei von GEI – Entitäten (phyvgl.cfg.dat )

```

C <<< Konfigurationsdatei fuer Einheiten und deren Bezug zum SI-System >>>
C
C   In dieser Datei muss immer dann ein neuer Eintrag durchgefuehrt
C   werden, sobald in den Dateien phydef.cfg.de|en.dat eine neue,
C   bislang noch nicht benutzte Einheit erstmals eingefuehrt wird.
C
C   -----
C   Konfigurationsdatei fuer physikalische Groessen und Einheiten
C   Deutsche Version
C   SCCS-IDs : @version 1.3 vom 03/02/10, Quellcode: phydef.cfg.si.dat
C   -----
C   2006-12-11 : G. Lang : Erstversion
C   -----

(...)
C Lfd Code- DimDE----- Beschreibung (deutsch)-----
DimEN----- Beschreibung (englisch)----
(...)
    103          103      mm/min                      Millimeter      pro      Minute
mm/min          millimeter per minute
(...)
ENDDATA

```

**Abbildung 9.2 Angepasste Konfigurationsdatei von GEI – Einheiten (phydef.cfg.si.dat)**

```

#
#   -----
#   Konfigurationsdatei fuer physikalische Groessen (Rest)
#   in dieser Datei werden die frueher in den Unterprogrammen
#   phydef3 bis phydef9 definierten Groessen zusammengefasst
#
#   SCCS-IDs : @(#) 04/19/10 2.79 phydef.cfg.rest.dat
#   -----

(...)

#
#   --AB---BC---CD---DXE-----EXF---FG-----GH---HI-----IJ-----JKKL-LXM---
M
(...)
1641      1      1      16 Niedersch      0      1.0000000      1      22      15951 F      1      -1
ENDDATA

```

**Abbildung 9.3 Angepasste Konfigurationsdatei von GEI – physikalische Größen  
(phydef.cfg.rest.dat)**

## 9.2 Mittlere Windgeschwindigkeiten nach Deutschem Wetterdienst

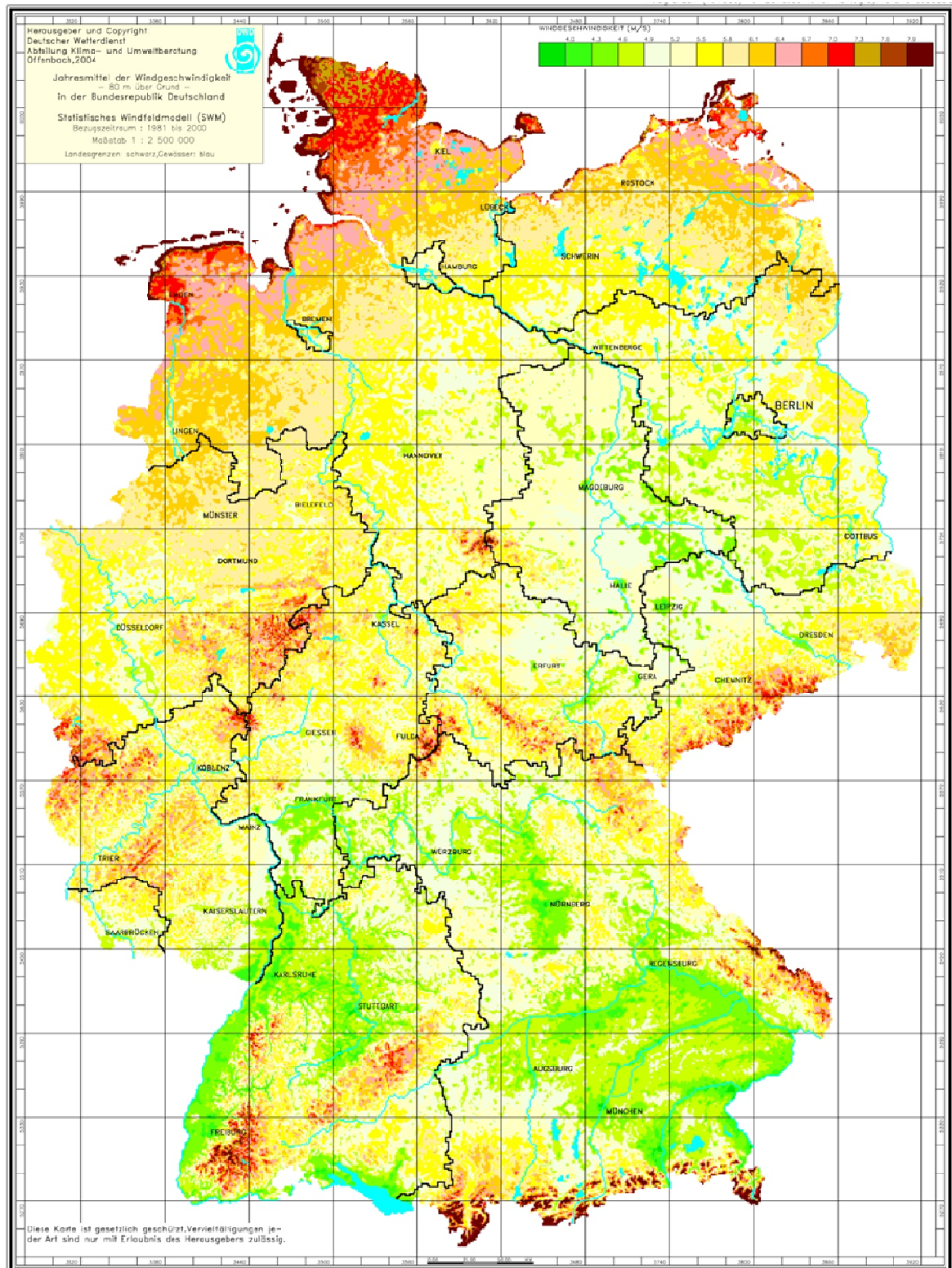


Abbildung 9.4 Mittlere Windgeschwindigkeiten in 80 m Höhe (Karte vom Deutschem Wetterdienst)

---

# 10 Curriculum Vitae

---

## Persönliche Daten

Name: Reußner  
Vorname: Frank Ludwig  
Geburtsdatum: 31.05.1974  
Geburtsort: Groß-Gerau



## Berufliche Erfahrungen

*Seit 2007*                      Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung -  
TU Darmstadt

*2006 – 2007*                      Softwareentwickler  
Morgen & Morgen, Diedenbergen

*2006*                              Softwareentwickler, IT-Berater  
CIP – Computer Integrierte Planung, Darmstadt

*2004 – 2006*                      Freiberuflicher Softwareentwickler, IT-Berater

## Freiberufliche Tätigkeit:

*2005 – 2006*                      Freier Mitarbeiter (Grundwassermanagement)  
CIP – Computer Integrierte Planung, Darmstadt

*2006*                              Softwareentwicklung (Grundwassermanagement)  
Envi-systems, Darmstadt

*2006*                              Softwareentwicklung (Finanzdienstleistung)  
Deeken, Darmstadt

## Studium

*1993 – 2005*                      Diplom Bauingenieurwesen,  
Hauptvertiefung: Bauinformatik  
Vertiefung: Geotechnik, Hydrologie / Hydraulik  
Weitere Qualifikationen: Ontologie, Phänomeno-  
logie, Logik  
TU Darmstadt

